MANUALI HOEPLI

ORESTE MURANI
Professore di Fisica nel R. Istituto Tecnico Superiore
in Milano

FISICA

DECIMA EDIZIONE
accresciuta e riveduta dall'Autore

CON 550 INCISIONI





ULRICO HOEPLI
EDITORE-LIBRAIO DELLA REAL CASA
MILANO

1917

TIPOGRAFIA SOCIALE — Milano, Via Goffredo Mameli, 15

PREFAZIONE ALLA DECIMA EDIZIONE

Questo manuale, in breve volger di tempo, è già alla decima ristampa. Tanta fortuna consigliava a poco innovare; ma, d'altra parte, i grandi e rapidi progressi della Fisica, specialmente dell'Elettricità, e la necessità di doverne tener conto in un libro moderno, per quanto modesto, mi hanno persuaso a introdurvi non poche aggiunte. L'ho, tuttavia, fatto con sobrietà, per non affaticar troppo chi in tale bellissimo studio muove i primi passi, e mi son limitato alle cose più necessarie a un' elementare coltura.

Il libro com'è risponde bene, in ogni sua parte, ai programmi delle nostre Scuole medie di 2° grado — Scuole normali, Licei, Istituti tecnici (corso comune) —; gli alunni di queste scuole vi troveranno, senza lacune, senza superfluità dannose, esposta ordinatamente la materia che forma oggetto del loro studio.

Ritoccando il testo qua e là, è stata mia cura assidua di renderne sempre più chiara e spedita la esposizione, parendomi che la chiarezza, non disgiunta dal rigore scientifico, sia la miglior dote di libri siffatti. Ad una più facile intelligenza di esso poi giovano, come io spero, le numerose e nitide figure che lo illustrano, e per cui il chiaro Editore non ha risparmiato spese. — Le cognizioni di Matematica richieste sono tra le più elementari, cosicchè da questo lato non può aversi difficoltà di sorta. Inoltre, di delibe-

rato proposito, ho evitato di entrare in questioni alquanto ardue, le quali trovano il posto che ad esse conviene in un grado più avanzato di tali studi.

Spero che anche questa nuova edizione per la quale non ho risparmiato, per quanto era da me, nè lavoro, nè diligenza, troverà presso gli egregi Colleghi, presso tutti gli studiosi, quella benevola accoglienza che si ebbero le altre edizioni; della qual cosa rendo anticipate e vive grazie.

Milano, Gennaio 1917.

PROF. ORESTE MURANI.

INDICE

Preliminari.

CAPITOLO I

Meccanica dei solidi.

CAPITOLO II.

Elasticità de' solidi.

CAPITOLO III.

Idrostatica.

CAPITOLO IV.

Azioni molecolari nei liquidi.

CAPITOLO V.

Aerostatica.

CAPITOLO VI.

Azioni molecolari nei gas.

CAPITOLO VII.

Acustica.

CAPITOLO VIII.

Dell'energia termica.

CAPITOLO IX.

Ottica.

CAPITOLO X.

Elettrostatica.

*

CAPITOLO XI.

Corrente elettrica.

CAPITOLO XII.

Magnetismo.

CAPITOLO XIII.

Elettromagnetismo.

CAPITOLO XIV.

Induzione elettromagnetica.

CAPITOLO XV.

Raggi catodici. Raggi X. Radioattività.

CAPITOLO XVI.

Macchine dinamoelettriche. Telefono e microfono. — Telegrafia senza fili.

CAPITOLO XVII.

Telegrafia senza fili.

CAPITOLO XVIII.

Elettricità atmosferica.

PRELIMINARI

1. **Natura, corpi, fenomeni.** — Per mezzo dei sensi apprendiamo l'esistenza degli innumerevoli oggetti o *corpi* che ci circondano, e che col loro insieme formano la *Natura*.

Si dice *materia* ciò che compone un corpo qualunque; essa è l'essenza medesima de' corpi; è la causa delle proprietà che affettano, e delle sensazioni che destano in noi.

La osservazione più ovvia ci persuade che i corpi sono formati da varie qualità di materia, dette *sostanze diverse;* così niuno confonderebbe il ferro con l'acqua, o con l'aria, ecc., ecc. Di più ci persuadiamo che i corpi vanno soggetti a continui ed incessanti mutamenti: vediamo, per esempio, che l'acqua raffreddata si agghiaccia; che una pietra lasciata a sè libera nello spazio cade; che il carbone scaldato nell'aria abbrucia, ecc., ecc. Tutti questi cambiamenti che i corpi ci presentano, sia nelle loro proprietà, sia nelle mutue loro relazioni, sono detti *fenomeni*.

A questa parola nel linguaggio scientifico non si dà dunque quel significato ristretto che essa ha nel linguaggio comune, secondo il quale un fenomeno consiste in un avvenimento straordinario atto

ad impressionare l'immaginazione, come un'aurora polare, un terremoto, un nubifragio.

2. **Osservazione, esperienza, legge, ipotesi.** — Studiare un fenomeno significa osservare attentamente come variano le quantità che lo determinano; e se si giunge a stabilire una relazione costante fra queste quantità variabili, allora si è stabilita la *legge* del fenomeno.

Ma il più delle volte accade che i fenomeni che la Natura ci presenta son talmente complessi, che non riusciamo a distinguervi gli effetti dovuti a cause molteplici, e a darne una spiegazione conforme a verità. È questa la ragione per cui gli antichi, essendosi limitati alla semplice osservazione, non fecero nello studio della Natura che scarsi e incerti progressi. Ma se gli antichi si arrestarono là, i moderni hanno inventato l'arte di mettere in giuoco e di dirigere l'azione delle forze naturali; questa arte, di cui il mondo va debitore massimamente a Galileo, e alla quale le scienze fisiche devono il loro meraviglioso progresso degli ultimi tempi, è l'*esperienza.*

Per mezzo dell'esperienza non solo i Fisici possono riprodurre i fenomeni, studiarli a loro agio, scoprirne de' nuovi, ma separando le cause essenziali che li determinano da quelle accidentali, pervengono con maggior sicurezza alla scoperta delle leggi che li governano.

In ogni caso, per stabilire siffatte leggi, si richiedono istrumenti e misure precise; cosicchè non soltanto nella scoperta de' fatti e delle loro leggi, ma ancora nell'invenzione di istrumenti e di metodi di misura, le scienze fisiche hanno realizzato, a' di nostri, grandi progressi.

Tuttavia, se lo studio della Natura si riducesse all'esame di ciascun fenomeno separatamente, la

scienza consisterebbe in una congerie di fatti, la quale poco o nulla ci direbbe intorno al meccanismo della Natura nella produzione de' fenomeni, e ben scarso profitto ne potremmo ricavare. Ciò che pertanto importa è di ordinare i fenomeni studiati, in modo che uno derivi da un altro più semplice; e così di fenomeno in fenomeno, per una catena non interrotta, studiarci di scoprire i principii fondamentali, ovvero, se è possibile, la causa unica da cui tutti dipendono.

Accade per lo più che non si riesca a scoprire con certezza la causa di una data classe di fenomeni, e allora per *induzione*, o per analogia con altre leggi, ne supponiamo una, facciamo cioè una *ipotesi*. Se l'ipotesi fatta è tale che da essa discendano logicamente tutti i fenomeni noti, e inoltre l'esperienza conferma tutti quelli che con rigore di ragionamento se ne possono dedurre, essa acquista un grado sempre crescente di verità, di certezza, e finisce per diventare *teoria*. Ma se succede il contrario, vale a dire se uno o più fatti che legittimamente se ne deducono contraddicono all'ipotesi fatta, allora bisogna rigettarla, o modificarla, o sostituirla con altra che abbracci e spieghi meglio tutti i fatti studiati.

3. **Scienze naturali.** — Lo studio della Natura, ossia de' corpi e de' fenomeni che essi presentano, è lo scopo delle *scienze naturali*. Queste costituiscono una vasta famiglia di scienze, che comprende l'Astronomia, i diversi rami della Storia Naturale, la Fisica, la Chimica, la Fisiologia, l'Anatomia, ecc. ecc., le quali si distinguono fra loro sia per i diversi corpi che imprendono a studiare, sia per l'aspetto particolare sotto il quale li considerano. Non è sempre possibile però tracciare tra l'una e l'altra un confine preciso, perchè ii campo de' loro studi è co-

mune; e uno stesso corpo, uno stesso fenomeno, può essere studiato da parecchie di loro; ne nasce che le diverse scienze naturali hanno molti punti di contatto e si porgono reciproco aiuto.

Vogliamo ora dire, in più particolar modo, quali siano gli intenti della Fisica e della Chimica, che hanno fra loro più strette relazioni.

4. **Fisica e Chimica.** — La Chimica si occupa di riconoscere e di classificare le diverse sostanze che costituiscono i corpi. Essa ha trovato che esiste un certo numero di *sostanze semplici, elementari* (circa ottanta), le quali possono combinarsi fra loro per formare tutti i corpi che sono nella Natura, e molti altri che non vi si trovano. La Chimica studia individualmente ciascun corpo, le loro combinazioni, i fenomeni ne' quali la costituzione intima della materia si trasforma *(fenomeni chimici)*.

La Fisica lascia, in generale, da parte quelle azioni che modificano la composizione de' corpi, e studia i fenomeni che si compiono senza trasformazione intima e permanente della materia *(fenomeni fisici)*.

5. **Stati fisici.** — Innanzi d'intraprendere lo studio sistematico de' fenomeni fisici, gioverà che esaminiamo alcune proprietà generali de' corpi, ed alcune proprietà particolari, allo scopo di scoprire alcunchè intorno alla loro costituzione. La più ovvia osservazione ci mostra che i vari corpi della natura hanno diversi *stati di aggregazione*, e possono dividersi in tre classi: *solidi, liquidi* e *gas*. I solidi, come il legno, il ferro, le pietre, ecc., sono più o meno duri e resistenti al tatto, ed hanno una forma propria perchè le loro parti sono strettamente unite le une alle altre, e non si possono rimuovere che mediante sforzi più o meno gagliardi.

Ne' liquidi, di cui l'acqua, il vino, la benzina, ecc. ci

offrono esempi famigliari, le parti si spostano invece con facilità le une rispetto alle altre, onde accade che essi non presentano una forma propria, ma assumono quella dei recipienti nei quali sono posti. I liquidi sono poi caratterizzati dal fatto che in piccola massa tendono a raccogliersi in goccie di forma sferica.

Ne' gas, di cui sono tipi notori l'aria, il gas dell'illuminazione, la mobilità delle parti è ancora maggiore; essi tendono a espandersi, e in conseguenza riempiono tutta la capacità de' vasi dove s'introducono.

A cagione della mobilità o scorrevolezza delle parti de' corpi liquidi e gassosi, essi sono anche detti *fluidi:* i gas si dicono allora fluidi espansibili, per accennare alla tendenza che hanno di espandersi in spazi sempre maggiori; e i liquidi, fluidi che tendono a raccogliersi in goccie quando siano in piccola quantità.

Il diverso stato di aggregazione non implica una sostanza diversa: così il ghiaccio, l'acqua ed il vapore ci offrono un esempio cospicuo di una sostanza che può assumere, secondo le diverse circostanze, i tre stati suddetti.

6. **Qualità specifiche dei solidi.** — I corpi solidi sono *duri* quando le parti loro si tengono saldamente unite insieme, e si richiede uno sforzo rilevante per poterle spostare; *molli* o *teneri* nel caso contrario. Propriamente il grado di durezza di un corpo si arguisce dall'attitudine che esso ha a scalfire gli altri; così, per esempio, il diamante che scalfisce tutti gli altri corpi è il corpo più duro che si conosca; il talco invece è uno dei più teneri. La durezza suole accompagnarsi con la *rigidità*, cioè con una grande resistenza che le parti di un corpo offrono ad uno spostamento relativo, quando

si tenti di piegarlo; non si può allora modificare sensibilmente la forma del corpo senza romperlo.

Sono *elastici* quei corpi che variano di forma e di volume per l'azione di forze esterne, e poi al cessare di queste riprendono la forma e il volume primitivo; *plastici* sono invece quelli che si deformano permanentemente. L'acciaio, l'avorio, il vetro, il marmo sono corpi elastici; la cera è un corpo plastico. Si chiamano poi *fragili* quelli che si spezzano facilmente: per esempio, il vetro; *malleabili* quelli che possono ridursi in lamine di tenue spessore; *duttili* quelli che si possono tirare in fili sottili. L'oro è il corpo più malleabile: si può ridurlo in fogli tanto sottili da volerne 70,000 per formare lo spessore di 1 millimetro; e il platino è tanto duttile che si può ridurre in fili del diametro di 1 millesimo di millimetro, e anche meno.

7. **Viscosità de' liquidi.** — Si può comporre una serie di sostanze solide una più tenera dell'altra, nella quale le ultime si potrebbero considerare come una transizione fra lo stato solido e il liquido.

La trementina e il miele, per esempio, presentano il grado intermedio; il che è una prova di più che la natura procede per gradazioni insensibili. Da una parte, avvicinandosi ai liquidi, incontreremo dei corpi la cui fluidità non è perfetta, per una resistenza interna, detta *viscosità*, che le parti incontrano a scorrere le une sulle altre: tali sono la glicerina, gli oli grassi (olio di lino, di ricino), l'acido solforico, corpi tutti che hanno una fluidità minore dell'acqua, dell'alcool, dell'etere. D'altra parte, avvicinandosi invece ai solidi, si incontrano il vischio, la pece, la ceralacca, i balsami, la cera, tutti corpi che hanno una grande viscosità interna, ma pure sono in certo modo scorrevoli, come si

può provare appoggiando soltanto ai due estremi un bastone di ceralacca; sarà questione di tempo, ma si troverà che alla fine esso si sarà piegato sotto il proprio peso.

Riassumendo, diremo dunque che la viscosità è una proprietà comune a tutti i liquidi; ma in alcuni essa è grandissima, paragonabile a quella del vischio; in altri è invece molto piccola, e però le loro particelle obbediscono subito alle azioni esterne, come se fossero perfettamente scorrevoli. Sono questi ultimi liquidi soltanto che, per effetto della gravità, assumono subito la forma del vaso che li contiene.

8. **Proprietà generali.** — Alcune proprietà sono comuni a tutti i corpi, e però sono dette *proprietà generali* della materia.

Diciamo brevemente di alcune di esse.

9. **Estensione. Impenetrabilità.** — Ciascun corpo è esteso, occupa cioè un certo spazio che si chiama il suo *volume*. Non potremmo neppure imaginare un corpo senza attribuirgli un certo volume. Ma una parte dello spazio mentalmente separata e distinta dallo spazio circostante, costituirebbe un solido geometrico; nel caso di un corpo reale, quella parte dello spazio che è il suo volume è occupata dalla materia propria del corpo.

Ora lo spazio occupato da un corpo non può essere contemporaneamente occupato da un altro: non è difatti concepibile la coesistenza di due particelle in un medesimo luogo; e per ciò, per arrivare al concetto di corpo fisico, all'idea di estensione bisogna aggiungere quella dell'*impenetrabilità*.

Molte volte un'osservazione superficiale potrebbe contraddire a questo fatto: così, per esempio, se si immerge nell'acqua un bicchiere capovolto, l'aria

contenuta in esso diminuisce di volume a misura che il bicchiere si approfonda, senza però cedere del tutto il posto all'acqua.

Sarebbe un errore il credere che una parte dell'aria abbia compenetrato l'altra parte; dovremo invece pensare che la materia di un corpo non formi un tutto continuo, ma sia formata dalla riunione di un'infinità di particelle elementari, poste le une vicine alle altre senza toccarsi. Allora si intende subito che, esercitando un'azione appropriata sul corpo, come nell'esempio suddetto, si possono forzare tali particelle ad avvicinarsi; cosicchè, diminuendo gli intervalli che le separano, il volume del corpo risulta diminuito. Ma non si potrà mai concepire che una di dette particelle materiali possa compenetrarne un'altra: in altre parole, non è concepibile che lo spazio occupato da una di esse sia contemporaneamente occupato da un'altra. Ne deriva che la impenetrabilità, piuttosto che una proprietà generale de' corpi, è una proprietà delle particelle elementari che li costituiscono.

10. **Divisibilità; costituzione de' corpi; molecole e atomi.** — Prima di andare innanzi, è necessario precisare un poco le nostre idee intorno alla costituzione de' corpi; perocchè, se noi riusciremo a fissare le nostre idee su tale questione fondamentale, le proprietà de' corpi che dovremo studiare ci appariranno come conseguenza di questa medesima costituzione. Tutti i corpi possono essere suddivisi in parti sempre più piccole; e questa divisibilità si estende talmente lungi, e la materia può acquistare un tal grado di tenuità, da essere indotti a credere che la divisibilità si possa spingere tanto oltre quanto si vuole. Quando un raggio di luce penetra in una camera tenuta all'oscuro,

noi vediamo sulla via del raggio agitarsi un pulviscolo tenuissimo, le cui particelle possono rimanere sospese nell'aria per la loro grande leggerezza. Quel pulviscolo è composto di esseri organizzati, di minutissimi frammenti di corpi che si trovano alla superficie del suolo: i solidi si possono infatti con azioni meccaniche ridurre in polvere impalpabile. Anche i liquidi fatti passare per piccoli fori sotto pressione, si riducono in un vero pulviscolo liquido. Ma gli esempi più noteveli della estrema divisibilità della materia ci sono offerti dalle soluzioni e dalla evaporazione: un cristallino di sale di cucina posto nell'acqua, scompare disciogliendosi nel liquido al quale comunica il sapore amaro che gli è proprio. Non sarebbe possibile, neppure con potenti microscopi, vedere nel liquido le particelle in cui il sale si è suddiviso; e se pensiamo che in ciascun punto almeno ce ne sarà una, ci persuaderemo che quel cristallino di sale è realmente composto da un numero prodigioso di particelle. La stessa cosa succede quando si versa nell'acqua una piccolissima quantità di una soluzione di indaco o di anilina, la quale tinge un volume di liquido enormemente maggiore del proprio.

Così anche il muschio, vaporizzandosi, diffonde la propria sostanza per vasti ambienti senza diminuire in modo sensibile di peso. Ma l'esempio più sorprendente della divisibilità della materia è quello degli animaletti microscopici, che con l'aiuto di potenti strumenti d'ottica si possono riconoscere a miriadi in una goccia d'acqua impura.

Dopo ciò è naturale la domanda: la divisione può spingersi all'infinito, o vi è un limite che è impossibile oltrepassare? Col pensiero, per quanto piccola s'immagini ridotta una particella di materia, noi potremo dividerla ancora in due parti; poi

ciascuna di queste si potrà supporre divisa di nuovo in due, e così via; astrattamente quindi non vi è limite alla divisibilità; ma si può dubitare che in natura la cosa sia veramente così. E invero, per spiegare le leggi delle combinazioni chimiche de' corpi, si ammette generalmente che la materia non si possa suddividere all'infinito, e si dà il nome di *atomi* alle più piccole particelle che entrano nelle chimiche combinazioni. Gli atomi sono pertanto l'ultimo limite a cui possiamo giungere coi *mezzi chimici d'investigazione.* (1)

Si contano oggi circa 80 specie di atomi, tante cioè quante sono le *sostanze elementari;* ma il loro numero varia perfezionandosi i metodi d'analisi.

Si ritiene inoltre che gli atomi, aggruppandosi fra di loro, formino le *molecole;* i corpi poi risultano formati da una infinità di molecole, poste, senza toccarsi, le une vicine alle altre. Possiamo quindi dire che *la molecola è l'ultima particella in cui si conserva ancora la natura di una sostanza.* Il numero di atomi poi costituente una molecola è ben determinato per ciascuna sostanza.

Le molecole possono risultare di atomi omogenei od eterogenei: nel primo caso si hanno i *corpi semplici,* detti anche *elementi chimici*, e gli atomi di uno stesso elemento sono tutti eguali fra di loro; nel secondo *i corpi composti.* Così, per es., la molecola di idrogeno si compone di due atomi di questa sostanza; similmente la molecola di ossigeno è formata da due atomi di tale sostanza; una molecola di acqua invece è formata di tre atomi, due

(1) Certi fenomeni, dei quali non è possibile ora tenere discorso, scoperti negli ultimi tempi, hanno rivelato che effettivamente gli atomi sono alla loro volta formati da particelle più piccole, gli *elettroni.*

di idrogeno ed uno di ossigeno: l'idrogeno e l'ossigeno sono sostanze semplici, l'acqua è una sostanza composta. Nelle combinazioni gli elementi non possono intervenire che con un numero intiero di atomi.

Le molecole quindi possono variare fra loro per il numero, per la qualità e per la disposizione degli atomi. Esse sono talmente piccole da poterle appena imaginare; ricordiamo all'uopo gli esempi di grandissima divisibilità detti sopra.

Tuttavia, nonostante l'estrema loro piccolezza, si è riusciti a determinare i pesi relativi delle molecole dei corpi, vale a dire il rapporto tra il peso della molecola di un corpo e il peso della molecola di un altro. Si è preso come tipo l'idrogeno, la cui molecola è la più leggiera; ed allora il peso molecolare di una sostanza relativo all'idrogeno, esprime quante volte la molecola di detta sostanza pesa più della molecola di idrogeno.

Per esempio, si è trovato che la molecola dell'ossigeno è sedici volte più pesante di quella dell'idrogeno: supponendo che entrambe sieno costituite da due atomi, se ne deduce il peso atomico relativo; ossia detto *1* il peso dell'atomo dell'idrogeno, quello dell'ossigeno è *16*.

Non dimentichiamo che la costituzione della materia concepita in questo modo, non è dimostrata con assoluta certezza. Ad ogni modo codesta ipotesi ha un grado altissimo di probabilità, perchè non solo spiega tutti i fatti conosciuti, ma è guida sicura nello studio di tutti i fenomeni.

Notiamo che non è il caso di parlare della figura degli atomi: volendoli rappresentare, converrà servirsi di semplici punti.

Aggiungeremo che in questi ultimi anni si è potuto calcolare con sufficiente approssimazione, ma per alcuni corpi soltanto, il numero delle molecole

contenute in un dato volume, e però si è giunti a conoscere all'incirca il vero peso di ciascuna di esse.

Tali questioni sono troppo delicate, e non le possiamo discutere in un libro elementare come questo: vogliamo però non tralasciare di dire che il numero delle molecole contenute in 1 cm.³ di aria si è trovato essere 18 seguito da 18 altre cifre; e che il numero delle molecole contenute in una goccia d'acqua è così grande, e le loro dimensioni sono quindi così piccole, che bisognerebbe, se fosse possibile, ingrandire quella goccia sino a diventar grande quanto la terra, per poter vedere le molecole grosse come ciliegie!



Fig. 1.

11. **Variabilità di volume.** — Il volume de' corpi, qualunque sia il loro stato di aggregazione, varia col mutare della pressione cui sono sottoposti, e per effetto del riscaldamento o del raffreddamento.

È noto che sotto le forti pressioni dei torchi tutti i solidi si restringono. Meno facile è di verificare la comprimibilità de' liquidi; questi corpi difatti subiscono diminuzioni di volume molto piccole sotto forti pressioni, e si possono solamente constatare col mezzo di delicati strumenti detti *piezometri*. I gas invece sono molto più comprimibili, come già abbiamo detto trattando dell'impenetrabilità, e come si può meglio mettere in evidenza, impegnando uno stantuffo a buona tenuta in un cilindro, e premendolo con la mano (fig. 1).

Ma v'è una causa che opera incessantemente sui corpi e ne modifica quasi in ogni istante il volume:

essa è il calore. Fatte poche eccezioni, tutti i corpi aumentano di volume quando vengono riscaldati. Una sfera metallica esposta alla fiamma d'una lampada, non passa più attraverso ad un anello nel quale prima passava con facilità (fig. 2).

Scaldando un liquido che riempie un palloncino di vetro munito di un lungo e sottile cannello, si vede che esso sale su per il cannello; ciò prova che il liquido si dilata più del vetro: su questo fatto si basa il termometro (§ 12).

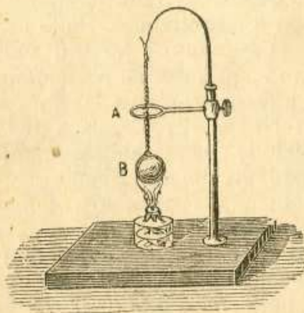


Fig. 2.


Fig. 3.

Ma i gas sono le sostanze più dilatabili per il calore: se prendiamo una vescica non gonfia che contenga soltanto poca aria, e se è bene serrata alla bocca, la vedremo subito gonfiarsi accostandola al fuoco. Più facilmente potremo verificare la cosa, prendendo una bolla di vetro munita di uno stretto cannello alquanto lungo ed aperto all'estremità: tuffando questa in un liquido (fig. 3) e scaldando

la bolla, non tarderanno delle bollicine d'aria a sprigionarsi dal cannello, sfuggendone attraverso il liquido, a cagione della dilatazione dell'aria. Lasciando raffreddare, il liquido salirà su per il cannello e andrà ad occupare il posto lasciato dall'aria. Se allora si accosterà la mano alla bolla di vetro, l'aria si riscalderà, e dilatandosi spingerà in giù il liquido: se invece che con la mano si tocca la bolla con un pezzo di ghiaccio, si vedrà la colonnetta liquida salire, perchè l'aria si contrae.

Queste semplici esperienze provano evidentemente che i gas subiscono notevoli variazioni di volume col variare della pressione e della temperatura.

12. **Termometro a mercurio.** — Della proprietà ora accennata che possiedono i corpi di variare di volume col calore, un'applicazione importantissima sono i *termometri:* questi strumenti servono a determinare la *temperatura* dei corpi, vale a dire quella loro speciale condizione per la quale si manifestano al tatto caldi o freddi in diverso grado.

Di essi il più usato è il *termometro a mercurio.* Per costruirlo, si prende un cannello di vetro capillare ben calibro, avente cioè da per tutto lo stesso diametro, e scaldandone fortemente un'estremità, si soffia una bolla. Scaldando di poi la bolla cautamente su di una fiamma, l'aria contenutavi si espande ed esce in parte dall'estremo aperto del cannello. Se di subito si tuffa questo estremo sotto la superficie del mercurio posto in un vaso, l'aria rimasta nella bolla, raffreddandosi, diminuisce di tensione e si riduce ad un minor volume; quindi la pressione dell'aria esterna spingerà su pel cannello il mercurio ad occupare il posto lasciato dall'aria.

Un po' dunque di mercurio sarà arrivato nella bolla; scaldandolo ad una lampadina, esso comin-

cierà presto a bollire, ed il suo vapore caccerà fuori l'aria, finchè tanto la bolla quanto il tubo conterranno soltanto vapore di mercurio. Allora immergendo di nuovo l'estremo aperto del cannello nel mercurio, il vapore interno si condenserà rapidamente col raffreddarsi e formerà un vuoto, a riempire il quale entrerà il mercurio, sempre sospinto dalla pressione dell'aria esterna. Indi, prima che il mercurio si raffreddi, e dopo averne regolata la quantità, si suggella l'estremo del

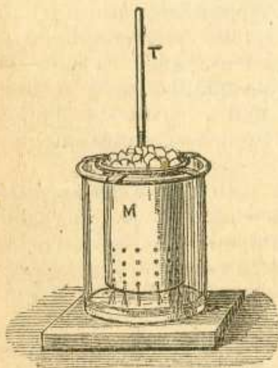


Fig. 4.

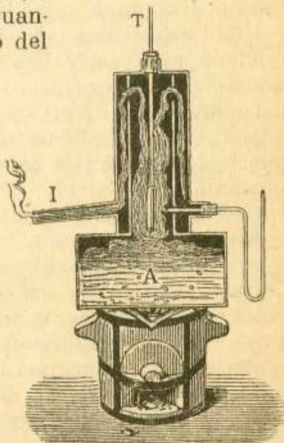


Fig. 5.

cannello fondendo il vetro col calore, e impedendo così all'aria di rientrarvi.

Per graduare il termometro, si pone la bolla e parte del cannello in un vaso contenente pezzetti di ghiaccio in fusione (fig. 4). La colonna di mercurio discenderà, e quand'essa sarà divenuta stazionaria, si segni sul tubo con un tratto la posi-

zione dell'estremo della colonnetta medesima. Questa è la posizione cui si ridurrà la colonnina tutte le volte che lo strumento sarà posto nel ghiaccio fondente, o in altro corpo che abbia la stessa temperatura.

Immergasi poi la bolla e parte del tubo nel vapore dell'acqua bollente in vaso aperto (fig. 5), e ve la si mantenga per alcun tempo; si segni ancor qui il punto occupato dall'estremità del filetto di mercurio quando sarà divenuto stazionario.

I due segni fatti così sul cannello sono i punti fondamentali della graduazione, e si contrassegnano, con 0° quello corrispondente alla fusione del ghiaccio, e con 100° quello corrispondente al vapor d'acqua bollente in vaso aperto. Si suppone che la pressione dell'aria sia quella che si verifica normalmente a livello del mare, perchè la temperatura di ebollizione dell'acqua non è costante, ma varia con la pressione.

Ora rimane soltanto che si divida la distanza tra questi due punti in 100 parti eguali, ciascuna delle quali è detta *grado*, e corrisponde ad una variazione di temperatura di un centesimo della differenza tra le due temperature fondamentali: il termometro così diviso è chiamato *centigrado*.

Conviene poi segnare sul cannello, al disotto di 0° e al disopra di 100°, altre divisioni di grandezza uguale alle precedenti, affinchè il termometro valga ad indicare altresì le temperature inferiori a quella del ghiaccio fondente e quelle superiori alla temperatura dell'acqua bollente. Le temperature superiori allo 0° sono considerate come positiva, e quelle al di sotto di 0° come negative.

Quanto si è detto sulla graduazione di un termometro, può servire a riconoscere se esso è giusto; perchè coprendone il bulbo per bene con ghiaccio

sminuzzato o con neve che si fonda, esso deve segnar 0°; e deve segnare 100°, involgendolo tutto nel vapore che si solleva dall'acqua bollente. A tale riguardo bisogna però sapere che col tempo il bulbo va scemando di capacità, e perciò quando si rimette il termometro nel ghiaccio fondente, il mercurio sovente si ferma sopra alla indicazione dello 0°; in tal caso l'istrumento indica temperature alquanto diverse dalle vere. Lo spostamento dello 0° può arrivare ad 1°; ma se si ha cura di aspettare qualche mese fra la costruzione e la graduazione, l'errore arriva tutto al più a 0°,2. È chiaro che, verificandosi tale spostamento, bisognerà, per avere la temperatura giusta, sottrarlo dalla indicazione del termometro se si tratta di temperature positive, e aggiungerlo nel caso di temperature negative.

È bene anche avvertire che il termometro va difeso da forti cambiamenti di pressione, che alterano la capacità del bulbo. Così sotto la campana della macchina pneumatica segnerebbe meno, e nella profondità del mare più del giusto, se non lo si proteggesse con una camicia di vetro.

Adottando la scala termometrica centesimale, i massimi calori estivi, per le nostre regioni, cadono fra i 30° e i 40°, sempre però tenendo il termometro difeso dalle radiazioni dirette del sole; ed i maggiori freddi notturni del verno cadono fra i 10° e i 20° sotto allo zero. La temperatura del corpo umano, in istato di salute, si mantiene tra i 36°,5 ed i 37°,5.

Un termometro a mercurio non può segnare temperature inferiori a — 39° che è il punto di congelamento del mercurio, o superiori a 358° che è il suo punto di ebollizione. Ed anzi bisogna sapere che la dilatazione del mercurio avviene con una

certa regolarità soltanto entro limiti ben più ristretti di quelli ora detti; giacchè ogni volta che la temperatura di un corpo si avvicina ad esser quella cui corrisponde un mutamento del suo stato fisico, la dilatazione diventa irregolare. Ne viene che le indicazioni del termometro a mercurio non sono attendibili che fra — 20° e 250° circa; fuori di questi limiti occorrono correzioni notevoli; anzi i fisici in tali condizioni non adoperano più il termometro a mercurio, bensì quello ad aria o ad idrogeno (§ 15); il termometro ad aria o quello ad idrogeno serve a tutte le temperature, le più gelide come le più ardenti, ma il loro uso non è tanto facile.

13. **Pregi di un termometro.** — Oltre ad esser giusto, il termometro deve essere *pronto* e *sensibile*. È pronto quando richiede poco tempo per mettersi in equilibrio di temperatura con il corpo col quale si pone in contatto: all'uopo dovrà avere piccola massa; gioverà anche che il bulbo sia esteso, ed è preferibile, sotto questo riguardo, un termometro col bulbo cilindrico a un altro col bulbo sferico. È sensibile quando serve a registrare piccole differenze di temperatura, per esempio decimi di grado; a tal fine deve avere il cannello molto sottile.

14. **Termometro ad alcool.** — Si costruiscono anche dei termometri ad alcool per la misura delle temperature molto basse, perchè l'alcool non si congela completamente neppure con freddi intensissimi.

Il termometro ad alcool si riempie come quello a mercurio, e vi si segna lo zero ponendolo pure nel ghiaccio fondente; ma esso non può esporsi ai vapori dell'acqua bollente, perchè l'alcool bolle a 80° circa, cosicchè per la sua graduazione bisognerà confrontarlo con uno a mercurio.

La fig. 6 indica la disposizione sperimentale: i due termometri, quello a mercurio e quello ad alcool, sono immersi entrambi nell'acqua di un vaso che si riscalda gradatamente con una fiamma.

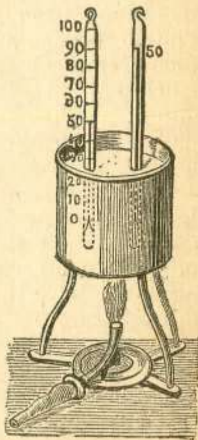


Fig. 6.

15. **Termometro ad aria.** — Non possiamo a meno di notare che il mercurio e l'alcool sono due sostanze termometriche affatto arbitrarie; in verità qualunque corpo che soddisfi alla condizione di dilatarsi regolarmente ogni volta che viene riscaldato, e, s'intende, di contrarsi quando viene raffreddato, può servire da termometro. Ora, quando si vogliono determinare temperature molto alte o molto basse, bisogna mettere da parte il termometro a mercurio e ricorrere a un termometro ad aria. Un termometro fatto con questa sostanza può servire quasi a tutte le temperature che noi possiamo sperimentare, perchè l'aria non si liquefa che a temperature bassissime; e inoltre si ha il vantaggio di adoperare una sostanza molto più dilatabile de' liquidi, e che va d'accordo perfettamente con qualunque altro termometro ad aria.

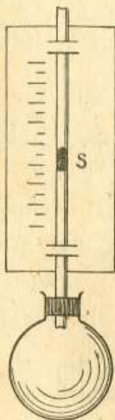


Fig. 7.

Ma come costrurre un termometro ad aria?

La prima idea è di ricorrere ad un palloncino munito di un cannello sottile (fig. 7), e di rinchiu-

dervi dell'aria, col mezzo di uno stantuffino di mercurio S che servirebbe da indice; d'immergerlo poi successivamente nel ghiaccio fondente e nel vapor d'acqua, e di dividere in 100 parti eguali l'intervallo compreso fra le due posizioni dell'indice. Ma bisogna notare che il volume dell'aria rinchiusa dipende anche dalla pressione che esercita l'aria esterna; di guisa che la determinazione delle temperature non si può fare così semplimente. Vedremo più tardi come si può operare.

16. **Termometro Réaumur e Fahrenheit.** — La graduazione termometrica descritta è detta *scala centigrada* di Celsio, ed è quella comunemente adottata negli usi scientifici; ma ve ne hanno due altre che pure importa conoscere, perchè talvolta usate.

Se l'intervallo fra i due punti fissi (il ghiaccio fondente e l'acqua che bolle), si divide in 80 perti, allora si ha la scala di Réaumur: lo stesso intervallo essendo così diviso, anzichè in 100, in 80 parti eguali, un grado Réaumur equivale a $\frac{5}{4}$ di grado centigrado; cosicchè, se la temperetura è data in gradi Réaumur, basterà moltiplicare per $\frac{5}{4}$ il numero di questi gradi per averla espressa in gradi centigradi.

L'altra scala è quella Fahrenheit usata in Inghilterra e negli Stati Uniti. In questo termometro, ai gradi 0 e 100 del centigrado corrispondono i gradi 32 e 212, cosicchè l'intervallo fra i punti fondamentali viene diviso in 180 parti; ne viene che, per ridurre in gradi centigradi una temperatura espressa in gradi Fahrenheit, si deve da prima togliere 32 dal numero di questi gradi, e poi moltiplicare il resto per $\frac{5}{9}$, perchè questo è il rapporto fra il grado

Fahrenheit e quello di Celsio; ovvero, in altre parole, il grado Fahrenheit equivale a $\frac{5}{9}$ del grado di Celsio.

17. **Spazi intermolecolari. — Porosità e filtrazione.** — Se le particelle elementari (molecole) che compongono i corpi sono immutabili, e questi variano di volume, è necessario ammettere che fra di esse devono esistere degli intervalli che saranno grandi rispetto alle loro dimensioni, ma pur sempre tanto piccoli da sfuggire ai nostri sensi.

Tali intervalli si chiamano *spazi intermolecolari*, o, meno propriamente, *pori fisici.* E in verità, senza i detti interstizi non potremmo spiegarci nè la comprimibilità dei corpi, nè la loro contrazione per diminuzione di temperatura, poichè bisognerebbe ammettere che gli atomi e le molecole si compenetrassero, la qual cosa è inconcepibile.

Oltre a quelli detti, vi sono altri fatti che giovano a confermare lo stato di discontinuità dei corpi. Per es., molti liquidi di diversa natura mescolati fra loro, offrono, dopo la miscela, un volume che è minore della somma dei volumi dei liquidi mescolati. Così fanno distintamente acqua ed alcool: per provarlo versiamo in un lungo cannello di vetro, sin verso la metà, dell'acqua, e poi cautamente riempiamo il resto con alcool colorato, che per ragione di densità galleggerà sull'acqua. Se allora, turando il cannello, lo si capovolge più volte in modo da ottenere il miscuglio dei due liquidi, si vedrà che questo non riempirà più tutta la capacità del cannello. Tale contrazione si spiega appunto col ravvicinamento delle molecole.

Non sono da confondersi gli interstizi molecolari coi *pori sensibili*, ossia colle cavità o meandri più o meno larghi che presentano certi solidi, come la

pomice, la carta, le spugne; tale porosità spiega il modo facile con il quale que' solidi si imbevono di liquidi e si lasciano attraversare da liquidi e da gas. Questa proprietà viene applicata nella *filtrazione*, per mezzo della quale si separano da un liquido le particelle che vi sono sospese. Di solito i liquidi si filtrano attraverso ad una carta speciale senza colla, detta *carta da filtro*.

Anche le varie specie di legno sono porose, come si prova chiudendo un' estremità di un largo tubo di vetro con una ciottola di legno piena di mercurio; ponendo poi il cilindro sul piatto di una macchina pneumatica — macchina atta ad estrarre l'aria dai recipienti —, e praticandovi il vuoto, il mercurio sotto l'azione della pressione atmosferica passa attraverso ai pori del legno, dividendosi in una pioggia minuta nell'interno del tubo.

18. **Peso de' corpi; gravità.** — Ogni corpo è pesante, e questa è un'altra proprietà generale. Se noi lasciamo un sasso libero nello spazio, esso cade seguendo una direzione fissa per un medesimo luogo detta *verticale*, che è data dalla direzione del filo a piombo. La verticale è, in ogni luogo, perpendicolare alla superficie delle acque stagnanti: per convincersene basterà attaccare una sferetta pesante ad un filo flessibile, e sospendere il filo a piombo così costrutto al di sopra dell'acqua contenuta in un catino; si osserverà che il filo e la sua imagine riflessa sono due linee rette sul prolungamento l'una dell'altra, qualunque sia la posizione dell'osservatore; ora, affinchè questo accada, è necessario che il filo sia normale alla superficie del liquido.

Se ne deduce che la verticale in un punto qualunque è diretta secondo il raggio della terra; e però le cose accadono come se tutta la massa della

terra esercitasse sugli oggetti posti alla sua superficie un'attrazione sempre diretta verso il centro. A questa attrazione si dà il nome di *gravità.*

Per impedire la caduta di un corpo, sappiamo che bisogna sostenerlo in qualche modo; e precisamente la pressione esercitata dal corpo sul sostegno che gli impedisce la caduta, misura il suo peso.

19. **Attrazione universale: gravitazione.** — Poichè la gravità opera al di sopra del suolo ad un'altezza qualunque, si è condotti a supporre per induzione che essa si estenda al di là dei limiti che ci è dato raggiungere, e che si eserciti anche sugli astri, per es. sulla luna, decrescendo però con la distanza. D'altronde è grandemente probabile che tutti gli astri offrano dei fenomeni analoghi, vale a dire che vi abbia una gravità alla loro superficie, ch'essa sia diretta verso il loro centro e che agisca ad una distanza qualunque su tutti gli altri corpi celesti: è appunto seguendo quest'ordine di idee che Newton fu condotto a scoprire che gli astri si attirano fra loro, che i loro movimenti sono determinati dalle reciproche loro attrazioni, e che il mondo tutto quanto è regolato da questa forza detta *gravitazione* o *attrazione universale,* di cui egli determinò la legge.

Diciamo che questa legge è il fondamento della Meccanica celeste, di quella scienza veramente sublime che studia il movimento de' pianeti, e ne sa prevedere le varie fasi pervenendo a conclusioni pienamente confermate dalla osservazione.

20. **Peso specifico.** — I vari corpi hanno diverso peso sotto egual volume: così, p. es., 1 litro di mercurio pesa molto più di 1 litro di acqua; il che si esprime dicendo che il mercurio è specificamente più pesante dell'acqua.

È detto *peso specifico* di un dato corpo il peso della sua unità di volume, ed è un carattere importantissimo de' corpi, perchè serve a distinguere fra di loro le sostanze che li formano. Indicando con P il peso di un corpo, con V il suo volume, con p il peso specifico, si ha, fra queste quantità, la relazione:

$$P = Vp.$$

Il valore numerico di p dipenderà dalle unità scelte per i pesi e per i volumi; ne è invece indipendente il *peso specifico relativo*, vale a dire il rapporto che passa tra il peso P del corpo dato, e quello P' di un altro corpo preso come tipo, avente lo stesso volume V del primo.

Se indichiamo con p' il peso specifico del corpo tipo, sarà:

$$\begin{cases} P = Vp \\ P' = Vp' \end{cases}$$

e, facendo i rapporti:

$$\frac{P}{P'} = \frac{p}{p'} = \omega$$

dicendo ω il peso specifico relativo.

Se si sceglie come corpo tipo l'acqua distillata a 4^0 e si segue il sistema metrico, poichè 1 cm^3 di acqua pesa 1 gr., ovvero 1 dm^3 di acqua pesa 1 kg., sarà:

$$p' = 1,$$

e la formula precedente si riduce a:

$$\omega = p,$$

cioè, nel sistema metrico, il peso specifico assoluto e il peso specifico relativo all'acqua sono espressi dallo stesso numero, se i volumi saranno espressi in centimetri cubi, e i pesi in grammi; ov-

vero i primi in decimetri cubi, e i secondi in chilogrammi.

La seguente tavola contiene i pesi specifici o densità di alcuni corpi relativi all'acqua.

Pesi specifici o densità di alcuni corpi relativi all'acqua.

Corpi	Densità	Corpi	Densità
SOLIDI			
Abete (legno secco) .	0,481	Ossa	1,656
Acciaio	7,833	Ottone fuso	8,396
Alabastro	2,876	Piombo fuso . . .	11,252
Alluminio	2,65	Platino battuto . .	21,259
Antimonio fuso . . .	6,702	" laminato . .	22.50
Argento battuto . . .	10,511	Potassa	2,264
Bismuto fuso	9,823	Potassio puro . . .	0,865
Bronzo da cannoni .	8,44	Quercia (legno secco)	0,950
Calce	2,2 a 2, 8	Rame battuto . . .	8,90
Cloruro di sodio . .	2,078	" in fili	8,78
Ferro battuto . . .	7,80	Soda	1,42
Gesso in polvere . .	2,332	Sodio puro	0,972
Ghiaccio	0,91674	Solfato di ferro . .	1,840
Ghisa	7,207	" di rame nat.	2,213
Granito	2,70	" di zinco . .	1,9 a 2,1
Litantrace compatto .	1,33	Solfo naturale . . .	2,033
Magnesio	1,87	Sughero secco . . .	0,240
Manganese	8,03	Stagno fuso	7,291
Marmo di Carrara . .	2,217	Vetro	2,40 a 2,89
Nichelio fuso	8,279	Zinco fuso	6,862
Oro battuto	19,362	" laminato . .	7,21
LIQUIDI			
Acido cloridrico (soluzione satura a 0°)	1,2109	Essenza di trementina	0,872
Acido nitrico	1,510	Etere acetico . . .	0,90104
" solforico . . .	1,843	" (solforico) . .	0,73658
Acqua dell'Adriatico in Giugno	1,02669	Glicerina	1,28
Idem, in Novembre .	1,02814	Latte di vacca . . .	1,030
Alcool	0,80950	Mercurio	13,59593
Benzina pura . . .	0,8895	Nafta	0,758
Cloroformio	1,52523	Olio d'oliva	0,915
		Sangue umano . . .	1,055
		Solfuro di carbonio	1,29312

Riferiremo in seguito i metodi adoperati per la determinazione dei pesi specifici; vogliamo però sin d'ora notare che questi dipendono dalla temperatura, poichè il volume occupato da un dato peso di un corpo varia con essa.

21. **Forze molecolari e stati fisici de' corpi.** — Oltre le attrazioni che si esercitano fra i corpi a distanza finita, vi sono attrazioni che si esercitano fra le particelle elementari de' corpi, e agiscono quindi a distanze piccolissime; esse sono dette forze molecolari e si distinguono coi nomi di *coesione* e *adesione*.

La coesione è l'attrazione che si esercita tra le molecole di un medesimo corpo, per cui esse si tengono unite ed oppongono una resistenza al loro spostamento o alla loro separazione. Dalla varia intensità di questa forza dipendono i tre stati fisici o di aggregazione de' corpi: mentre essa è grandissima ne' solidi, ne' gas si può dire quasi nulla, come lo prova il fatto che le loro molecole tendono a scostarsi vieppiù le une dalle altre, cioè ad espandersi.

Ne' liquidi poi, sebbene le particelle loro possano scorrere liberamente, vi è pur coesione: difatti essi in piccola massa si raccolgono in goccioline di forma sferica, ossia sotto il minimo contorno, e si richiedono notevoli quantità di calore per poterli vaporizzare, per disgregarne cioè le molecole.

Abbiam detto che nei gas la coesione manca, ovvero, se esiste, è piccolissima, come dimostra la loro tendenza ad espandersi: una prova esiste nel fatto che gli odori, i gas che si sviluppano in un sito, si propagano tutto all'intorno, ma si può fare un'esperienza diretta. Prendiamo una vescica ben chiusa e contenente poca aria, e poniamola sotto la campana

della macchina pneumatica (fig. 8). Facendo agire la macchina, si vedrà la vescica gonfiarsi a misura che l'aria va rarefacendosi sotto la campana. Se poi lasciamo rientrare l'aria, la vescica ritorna ben presto a riprendere il suo primo volume, equilibrandosi in ogni caso la pressione dell'aria contenuta nella vescica con quella esterna.

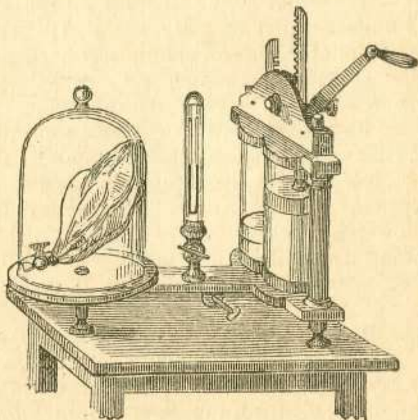


Fig. 8.

L'attrazione poi che si esercita fra le molecole di due corpi distinti, e posti a perfetto contatto, dicesi adesione.

Ecco due dischi di vetro ben piani e levigati: se li portiamo ad intimo contatto, possiamo constatare subito che ci vuole una forza per staccarli, la quale è ben grande in certi casi; succede talora che due lastre da specchio sovrapposte si rompano piuttosto che separarsi. L'adesione perdura anche

nel vuoto, e perciò non si può ascriverla alla pressione atmosferica.

L'adesione ha luogo anche fra corpi eterogenei; così una lastra di rame ed una di argento passate al laminatoio si saldano insieme. Vi è adesione non solo tra corpi allo stato solido, ma anche fra solidi e liquidi, tra solidi e gas, tra liquidi e gas. Le colle, i mastici, le vernici e le soluzioni ci danno esempi di forte adesione fra liquidi e solidi. Il carbone che ha un gran potere assorbente per certi gas dannosi alla salute, ci mostra un esempio di forte adesione fra solidi e gas; l'ammoniaca del commercio è una soluzione del gas ammoniaca nell'acqua, e ci offre un esempio notevole di codeste azioni molecolari fra un liquido e un gas, ecc.

L'adesione poi ci spiega perchè un pezzo di vetro immerso nell'acqua si bagna: in tal caso l'attrazione fra solido e liquido è maggiore della coesione, ossia dell'attrazione fra le molecole del liquido.

22. **Affinità.** — Oltre la coesione e l'adesione che si esercitano fra le molecole de' corpi, vogliamo fare un cenno anche dell'attrazione che si esercita direttamente fra gli atomi, denominata *affinità chimica*. Essa si manifesta in grado diverso secondo la diversa qualità degli atomi: per es., grandissima è l'affinità del carbone per l'ossigeno; basta scaldare il carbone nell'aria sino a una certa temperatura perchè gli atomi d'ossigeno e quelli di carbonio si precipitino gli uni sugli altri con grande velocità, e formino le molecole di un corpo nuovo detto *anidride carbonica*.

Notiamo che, quando si dice che la gravità, la coesione, l'adesione, l'affinità consistono in attrazioni, constatiamo un fatto, ma non sappiamo quale sia poi la natura intima di queste forze: per questo

bisognerebbe conoscere l'essenza della materia. Senza l'affinità chimica, senza la coesione, la Natura si ridurrebbe a poche diecine di sostanze allo stato gassoso.

23. **Elasticità.** — La coesione ha stretta relazione con un'altra proprietà generale de' corpi, l'*elasticità*, la quale consiste in ciò che i corpi sottoposti ad azioni meccaniche, purchè queste, se si tratta di solidi, non oltrepassino certi limiti, tendono a riacquistare la forma e il volume primitivi, e l'acquistano più o meno perfettamente quando cessano di agire quelle azioni meccaniche. Torneremo in seguito su questo soggetto: vogliamo però notare sin d'ora che i liquidi e i gas sono corpi pefettamente elastici. Quanto a questi ultimi, se nell'esperienza della fig. 1 si cessa di premere sullo stantuffo, questo ritorna alla posizione primitiva, rivelando che la massa d'aria sottoposta allo stantuffo riacquista lo stesso volume: lo stesso fatto è provato dall'esperienza della vescica che si gonfia rarefacendo l'aria sotto la campana della macchina pneumatica, e poi torna al volume primitivo.

Tra i solidi sono corpi molto elastici l'avorio, il marmo, il vetro, l'acciaio, il bronzo, ecc. Per provare l'elasticità di una palla d'avorio, spalmiamo d'inchiostro litografico, od anche semplicemente affumichiamo, la faccia superiore di una lastra di marmo ben liscia, tenuta orizzontalmente. Se vi appoggiamo la palla d'avorio, questa si tingerà in un solo puntino; ma lasciandola invece cadere dall'alto, si vedrà dipingersi sulla palla una calotta nera, segno evidente che la sfera, schiacciandosi nell'urto, ha potuto combaciare col marmo su una superficie abbastanza estesa. Ora tornando ad applicare di nuovo la palla sul piano in qualunque punto, non si vedrà che dipingersi un puntino nero come

prima; il che prova che la sfera, dopo essersi alquanto schiacciata, ha ripreso la primitiva forma.

24. **Solubilità de' solidi.** — Immergendo in tanti vasi pieni d'acqua alcuni solidi, come un pezzo di allume, di vetriolo turchino, di sale o di zucchero, si osserva che tali sostanze a poco a poco si assottigliano e scompaiono, e la colorazione del vetriolo si comunica alla massa che lo circonda. È questo il fenomeno della *soluzione:* esso prova manifestamente che l'adesione dell'acqua con i solidi è maggiore della coesione che si esercita fra le molecole dei detti corpi, cosicchè queste disgregandosi mano a mano vanno a vagare fra le molecole del liquido. Ed è chiaro che, mentre il solido si discioglie, le condizioni dell'acqua andranno gradatamente mutando, perchè si carica di un'altra sostanza: ad esempio, per l'acqua che tiene in soluzione de' sali, mutano e il punto di solidificazione e quello della ebollizione. Quando il pezzo del solido immerso è abbastanza voluminoso, l'esperienza insegna che viene un momento in cui cessa di disciogliersi; si dice allora che la soluzione è *satura*, e si trova che la densità del liquido è uniforme in tutte le sue parti: e se si ripete l'esperimento con lo stesso solido e con lo stesso liquido, alla medesima temperatura, la densità della soluzione satura non muta, ossia è sempre lo stesso il rapporto (*coefficiente di saturazione*) tra il peso del solido occorrente per la saturazione e quello del solvente.

Coll'aumentare poi della temperatura, aumenta la quantità del solido richiesta a saturare il liquido, il che prova che la solubilità aumenta con la temperatura.

Accade inoltre che, mentre un solido non si discioglie in un liquido, esso si disciolga abbondantemente in un altro: esempio lo zolfo che non si

discioglie nell' acqua, ma si scioglie benissimo nel solfuro di carbonio.

25. **Cristallizzazione.** — Per avere una soluzione certamente satura, porremo nel liquido il solido in eccesso. Se poi, filtrata una soluzione satura, ne esamineremo una goccia con i più potenti microscopi, non ci riuscirà di vedere il sale disciolto. Colla soluzione dunque il solido si è realmente disgregato nelle sue molecole. Ma se lasciamo che la soluzione satura svapori o si raffreddi, diminuendo allora la quantità del solvente, o abbassandosi col raffreddamento il coefficiente di saturazione, l' eccesso del corpo disciolto finirà per separarsi dal liquido e deporsi sul fondo del recipiente. Questo fenomeno è detto *precipitazione*. Ora se la precipitazione succede lentamente in un vaso di conveniente capacità, e non è disturbata, invece di ottenere sul fondo del vaso un deposito polverulento, compariscono dei nuclei solidi che mano a mano si accrescono ed acquistano forme geometriche terminate da faccie piane, ossia i *cristalli*. Esaminando uno di questi cristalli, si troverà che esso si può facilmente dividere secondo certe direzioni (sfaldature); e così, spingendo sempre più innanzi il processo di separazione, veniamo a persuaderci che il poliedro su cui si è operato è un aggregato regolare d'altrettanti cristalli più piccoli, tutti dell'identica forma geometrica.

Non sempre il precipitato della soluzione può presentare struttura cristallina; ma, quando ciò avviene, il miglior mezzo di produrre la cristallizzazione è quello di sospendere con un filo un piccolo cristallo della stessa sostanza disciolta in mezzo ad una soluzione satura, che si lascia evaporare o raffreddare lentamente (*cristalizzazione per soluzione*).

La soluzione non è il solo mezzo che si può adoperare per ottenere il fenomeno della cristallizzazione: i corpi possono anche cristallizzare se, dopo essere stati fusi col mezzo del calore, si lasciano raffreddare in perfetta quiete (*cristallizzazione per fusione*). Se, per es., si fa fondere dello zolfo in un crogiuolo, e, appena comincia a solidificarsi, versiamo la parte liquida, vedremo le pareti del vaso tappezzate di cristalli aghiformi.

La cristallizzazione si produce anche quando una sostanza solida si riduca direttamente in vapore, e questo vada a depositarsi su una superficie fredda, come succede con la canfora chiusa in una boccetta di vetro; le pareti di questa si tappezzano di cristalli di canfora dovuti ai vapori che si condensano (*cristallizzazione per sublimazione*). Anche i bei fiorami di ghiaccio che nelle rigide giornate d'inverno coprono i vetri delle finestre, ripetono la medesima origine, sono cioè formati dal vapor acqueo che si condensa sui vetri freddi.

Vi sono però sostanze che non cristallizzano, come la gomma, la gelatina, la colla: esse sono dette *colloidi*.

CAPITOLO I.

Meccanica dei solidi.

26. **Cinematica.** — Il più generale di tutti i fenomeni, quello al quale si procura di ridurre tutti gli altri, è il *moto*. Lo studio del moto, indipendentemente dalle cause che lo producono e dalla materia del mobile, si chiama *cinematica*. Per maggiore semplicità supporremo, per ora, che il mobile sia un punto.

27. **Quiete e moto.** — Un punto si dice in quiete, se occupa costantemente la stessa posizione nello spazio; si dice invece in moto, se nei tempi successivi occupa posizioni diverse nello spazio. È evidente che per renderci conto della quiete o del moto di un punto, bisogna riferire la sua posizione ad un altro punto dello spazio.

Idealmente possiamo concepire che un punto sia in *quiete assoluta*, vale a dire che occupi costantemente la medesima posizione dello spazio; allora il moto di un punto riferito a quello che s'immagina in quiete assoluta, dicesi *moto assoluto*.

Avvertiamo subito che la quiete e il moto assoluti sono una pura astrazione matematica; in realtà in natura non si possono osservare che *quiete* e

moti relativi, poichè in tutto l'Universo non c'è nessun punto materiale in quiete assoluta, ma tutti i corpi sono incessantemente animati da molteplici e svariati moti. E diremo che un punto è in quiete o in moto rispetto ad un altro punto in moto, secondo che rimanga la stessa o varî la reciproca posizione. Per esempio, i viaggiatori seduti in una carrozza di un treno in moto, sono in quiete relativa fra di loro; e il treno è in moto relativo rispetto alla stazione, perchè questa non è in quiete assoluta, ma partecipa al movimento della terra. Tuttavia, a semplificare le cose, imaginiamo che la stazione sia realmente in quiete, poichè, pel fatto del movimento della terra che ci trascina con sè nello spazio, le cose rimarebbero situate le une rispetto alle altre sempre a un modo, come se la terra fosse ferma. E tanto è vero questo, che ci bisogna fare uno sforzo di ragionamento per persuaderci che la terra è realmente in moto, e che, nell'esempio addotto, la stazione è anch'essa in movimento.

Un corpo qualunque è un aggregato di punti materiali (molecole), animati incessantemente da moto; e però diremo che un corpo è in quiete, quando non si spostano nello spazio que' punti intorno ai quali ciascuna molecola si muove; ed è invece in moto, quando i detti punti mutano di luogo nello spazio.

28. **Traiettoria.** — Dicesi *traiettoria* la linea descritta da un punto nel suo movimento: essa è necessariamente continua, perchè il mobile nel muoversi da un luogo ad un altro, deve passare per tutti i punti intermedi.

Il moto dicesi *rettilineo* o *curvilineo*, a seconda che la traiettoria è una linea retta o una linea curva, e si distinguono diversi moti curvilinei: il circolare, l'ellittico, il parabolico, ecc. ecc.

La *direzione del moto* in un punto di una traiettoria curvilinea, coincide con la direzione della tangente in quel punto.

Quando si parla di spazio percorso da un punto in un certo tempo, s'intende di considerare la parte di traiettoria da esso effettivamente descritta in in quell'intervallo di tempo.

29. **Moto uniforme e moto vario.** — Se il mobile percorre spazi eguali in tempi eguali, comunque piccoli, il moto è detto uniforme: allora è costante il quoziente dello spazio descritto dal mobile per il tempo impiegato a descriverlo; e si dà il nome di *velocità* al quoziente suddetto. Cosicchè, se denominiamo s lo spazio percorso, t il tempo impiegato a percorrerlo, v la velocità, si ha:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Nel moto uniforme pertanto, la velocità è lo spazio descritto nell'unità di tempo.

Se invece il rapporto dello spazio al tempo non si conserva costante, qualunque sia il tempo considerato, il moto è vario. È *accelerato*, se gli spazi percorsi in tempi eguali e successivi vanno aumentando; è *ritardato* nel caso opposto.

30. **Velocità media; velocità istantanea.** — Quando il moto è vario, non si può più parlare di velocità in genere, perchè essa cambia da un istante all'altro; bisogna quindi riferirla ad un dato istante, cioè al termine di un dato tempo, al quale corrisponderà sulla traiettoria un punto determinato: e la velocità del mobile in quel dato istante esprime lo spazio che sarebbe percorso nella successiva unità di tempo, quando da quel punto in poi essa più non mutasse. Così dicendo, per esempio, che la velocità del mobile in un dato punto della traiet-

toria è di 20 metri, si vuol significare che, se a partire da quell'istante il moto diventasse uniforme, il mobile percorrerebbe 20 metri in ogni successivo minuto secondo.

Spiegato così il significato di velocità istantanea in un punto della traiettoria, vediamo ora in qual modo possa essa determinarsi; e per aiutare l'imaginazione, supponiamo che la curva $x\ y$ sia la traiettoria del movimento, e che il mobile si muova nel verso della freccia (fig. 9). Prendiamo un punto qualunque A della traiettoria, e proponiamoci di determinare la velocità che in esso ha il mobile. L'unico modo che abbiamo per riuscire a questo, è di considerare un altro punto B che segue A, e contare il tempo che il mobile impiegherà a passare da A in B: divideremo poi lo spazio $A\,B$ per questo intervallo di tempo, e così avremo determinato la *velocità media* in quel tratto, la velocità cioè che dovrebbe avere il mobile per percorrere di moto uniforme lo stesso spazio nello stesso tempo.



Fig. 9.

Così, per esempio, quando si dice che un treno ha la velocità di sessanta chilometri all'ora, non si parla della sua velocità vera che potrà essere diversissima ne' diversi punti, ma della velocità media con la quale si muove da un luogo ad un altro, ora accelerando, ora ritardando, e talora anche fermandosi. Ma la velocità media così determinata dipende evidentemente dalla posizione dei punti A e B, e riesce diversa ne' diversi tratti: inoltre essa può avere un valore ben differente dalla velocità istantanea in A; ma se s'imagina che il secondo punto B si avvicini sempre più ad A, la velocità media nel tratto $A\,B$ si andrà sempre più avvici-

nando al valor vero della velocità nel punto A; cosicchè, se lo spazio $A\,B$ è brevissimo, molto piccolo sarà anche l'intervallo di tempo, e la velocità vera e la velocità media saranno espresse dallo stesso numero. Il che si esprime dicendo che la velocità istantanea in un punto della traiettoria, è il limite verso cui tende la velocità media in un tratto brevissimo che segue quel punto. Per calcolare detto limite bisogna conoscere la legge secondo la quale varia con il tempo lo spazio percorso, ossia l'*equazione del movimento*.

Tutto questo si applica tanto al moto rettilineo che al moto curvilineo, ricordando però che in quest'ultimo caso la direzione del moto, ossia quella della velocità, è data dalla tangente alla traiettoria nel punto considerato, e però varia di continuo.

31. **Moto uniformemente vario.** — Fra i tanti moti vari, ve n'ha uno nel quale la velocità del mobile varia proporzionalmente al tempo. In tal caso l'*accelerazione*, ossia la variazione di velocità nell'unità di tempo, è costante: se essa è un aumento si prende positiva, e il moto è *uniformemente accelerato* (esempio, la caduta libera nel vuoto di un corpo pesante); se essa invece è una diminuzione, si prende negativa, il moto dicesi *uniformemente ritardato* (esempio, l'ascesa verticale libera nel vuoto di un corpo pesante). Indicando codesta accelerazione con c, la variazione di velocità che si verificherà nell'intervallo t sarà $c\,t$; e se si suppone che all'origine del tempo, nell'istante cioè in cui si comincia a contare il tempo, la velocità del mobile *(velocità iniziale)* era u, la velocità v nel tempo t è data dalla relazione:

$$v = u \pm ct. \qquad (1)$$

Si prenderà il segno + nel caso del moto uniformemente accelerato, e il segno — nel caso del moto uniformemente ritardato.

Per avere lo spazio percorso dal mobile nel detto intervallo di tempo t, calcoliamo la velocità media e moltiplichiamola per il tempo t. La velocità media è evidentemente eguale a $u \pm \frac{ct}{2}$; cosicchè lo spazio sarà dato dalla relazione:

$$s = ut \pm \frac{ct^2}{2}. \qquad (2)$$

Le equazioni (1) e (2) contengono cinque grandezze; quando tre di esse sono date, ogni problema è determinato e l'algebra insegna a risolverlo.

Notiamo in particolare che quando $u = o$, quando cioè la velocità iniziale è nulla, la (1) e la (2) si riducono più semplicemente alle:

$$v = ct; \; s = \frac{ct^2}{2}. \qquad (3)$$

In tal caso l'accelerazione è misurata dal doppio dello spazio percorso nella prima unità di tempo.

Supponiamo ora che si tratti del moto uniformemente ritardato, e risolviamo, come esercizio, il problema seguente: data la velocità iniziale u e l'accelerazione costante c, e conoscendosi la velocità v del mobile in un punto della traiettoria, quale è il tempo da esso impiegato per giungere a questo punto, e quale è lo spazio percorso? La (1) e la (2) nelle quali si prenda il segno — per l'accelerazione servono alla risoluzione del quesito, poichè basterà

ricavare il valore del tempo dalla prima e sostituirlo nella seconda; si ha così:

$$t = \frac{u - v}{c}; \quad s = \frac{u^2 - v^2}{2c}. \tag{5}$$

Si deduce dalla prima che per il valore del tempo uguale a $\frac{u}{c}$, la velocità del mobile diventa zero: ossia, trascorso il detto tempo, il mobile un istante si ferma; ma poi, essendo sempre soggetto all'accelerazione c, il suo moto si farà in senso opposto e diverrà uniformemente accelerato.

Ponendo eguale a zero la v nella seconda delle (5), si ha lo spazio totale h percorso dal mobile con moto uniformemente ritardato:

$$h = \frac{u^2}{2c}.$$

32. **Il metro; il minuto secondo.** — In queste formole occorrono lunghezze e tempi; prima di andare innanzi sarà bene d'intendersi intorno alle unità per la loro misura.

L'unità per la misura delle lunghezze è il *metro*: esso venne originariamente definito la quarantamilionesima parte del meridiano terrestre. Le successive misure però hanno provato che il campione costrutto non risponde esattamente a tale definizione; per cui bisognerà definire il metro secondo il campione degli Archivi, e dire: *il metro è la lunghezza, alla temperatura di zero gradi, del prototipo internazionale,* che è un regolo di platino iridiato, il quale si custodisce nell'Ufficio Internazionale de' Pesi e delle Misure a Parigi.

In Italia i prototipi nazionali del metro e del chilogrammo, che sono esattissime riproduzioni di

quelli internazionali, si conservano a Roma nel Laboratorio Centrale Metrico.

I multipli e sottomultipli decimali del metro, con le abbreviazioni loro, secondo quanto venne deliberato dall'Ufficio Internazionale suddetto, sono contenuti nel seguente specchietto:

km	Chilometro	1000
—	Ettometro	100
—	Decametro	10
m	Metro	1
dm	Decimetro	0,1
cm	Centimetro	0,01
mm	Millimetro	0,001
μ	Micron	0,000001.

L'unità di superficie è il metro quadrato, cioè un quadrato che ha per lato un metro: per indicare i suoi multipli e sottomultipli, si usa dare l'esponente ^{2} alle abbreviazioni suddette; così, per esempio, la notazione *cm.*^{2} vuol dire centimetro quadrato.

L'unità di volume è il metro cubo, cioè un cubo che ha per lato un metro. Del metro cubo non si usano che i sottomultipli, i quali si esprimono dando l'esponente ^{3} alle stesse abbreviazioni; per esempio, la notazione *dm.*^{3} vuol dire decimetro cubo.

Per determinare il volume de' liquidi servono alcune misure di capacità che hanno per base il *litro*: il litro si definisce il volume occupato da un chilogrammo d'acqua distillata a 4°: esso corrisponde molto prossimamente al volume di 1 *dm.*^{3}; i suoi multipli e sottomultipli sono il decalitro [*dal.*], il decilitro [*dl.*], il centilitro [*cl.*].

Veniamo ora alla misura del tempo.

Il *giorno sidereo* è la durata della rotazione uniforme della terra intorno al proprio asse; esso è costante, ed è misurato dall'intervallo di tempo compreso fra due consecutivi passaggi di una medesima stella allo stesso meridiano. Il giorno solare, vale a dire il tempo che decorre fra due consecutivi passaggi del sole al meridiano di un luogo, supera un poco il giorno sidereo, a cagione del movimento della terra nella sua orbita. E poichè questo moto è vario, ne viene che i giorni solari veri di un anno non hanno tutti la stessa durata, differendo però assai poco l'uno dall'altro. Allora, per la misura del tempo, si è convenuto di fissare un *giorno solare medio*, facendo la somma di tutti i giorni solari veri di un anno, e dividendola per il loro numero. Il giorno medio è la base per la misura del tempo, e serve a regolare gli orologi: esso viene diviso in 24 parti dette ore medie; l'ora si divide in 60 parti detti minuti primi medi; e la sessantesima parte del minuto primo, ossia

$$\frac{1}{24 \times 60 \times 60} = \frac{1}{86400}$$

del giorno solare medio, è detta *minuto secondo medio*. Questo, per convenzione, è preso come unità del tempo.

Anche il giorno sidereo si divide allo stesso modo; e un secondo solare medio è uguale a 1,00273 minuti secondi siderei; un giorno sidereo equivale a 86164 secondi solari medi. Il minuto secondo solare medio, unità del tempo, s'indica con il simbolo 1^s e non $1''$, per non confonderlo col secondo di arco. Così, per esempio, 10^s vuol dire 10 minuti secondi medi. L'aggiunto *medi* il più delle volte si tralascia, perchè viene sottinteso.

Tavole di alcune velocità medie notevoli, in metri al secondo

Un buon camminatore	1,60
Un cavallo al trotto per viaggio . . . . da 2 a	2,60
La cometa di Halley all'afelio	3,25
Un bastimento che fila 9 nodi all'ora (9×1852^m) .	4,63
Un cavallo al galoppo . . . . da 4 a	5
Vento ordinario . . . . da 5 a	6
Brezza	10
I migliori cavalli di razza, al trotto	12
» » » al galoppo	15
Treno rapido 50 Km. all'ora	16,67
Piccioni viaggiatori	18
Burrasca . . . . da 25 a	30
Trasmissione delle sensazioni dei nervi umani .	33
Uragano	40
Gli uccelli più rapidi	89
Propagazione del suono a 10° C.	337
Palla da fucile . . . . da 300 a	400
Un punto dell'equatore terrestre	493
Palla da cannone	500
Rivoluzione della luna intorno alla terra . . .	1012
Rivoluzione della terra intorno al sole	29516
La cometa di Halley al perielio	393160
Impulso elettrico nei fili telegrafici aerei . . .	36000000
Velocità della luce	300000000

33. **Movimento composto; composizione di due moti rettilinei e uniformi d'un medesimo punto.** — Finora abbiamo supposto che il mobile fosse animato da un solo movimento; ora vogliamo vedere come esso si muoverà nel caso che sia animato da più moti simultanei, detti *moti componenti,* che supporremo rettilinei e uniformi. Chiariamo la cosa con un esempio: un viaggiatore si muove di moto rettilineo e uniforme sul ponte di una nave, che è in viaggio per un lago tranquillo; e nell'istante che lo consideriamo abbia, relativamente alla nave, la velocità u, rappresentata in grandezza e dire-

zione dalla retta AC (fig. 10), cosicchè nell'unità di tempo esso percorrerà il tratto AC della retta Ay tracciata sul ponte. Ora supponiamo che la nave sia animata dalla velocità v rappresentata dalla retta AB, cosicchè essa si avanzerà in 1^s da A in B in linea retta, supposto pure il moto uniforme. È chiaro che il viaggiatore, rappresentato per semplicità nella figura con il punto A, sarà contemporaneamente animato dalle velocità u e v. Ora, de-

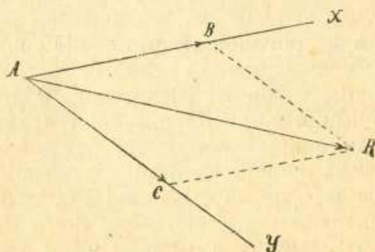


Fig. 10.

corso 1^s, la retta AC avrà assunto la posizione BR sulla superficie del lago, e nello stesso tempo il viaggiatore sarà passato su essa da A in C, e perciò egli occuperà sulla superficie del lago la posizione R, avendo effettivamente percorso, con moto uniforme, il cammino AR.

Possiamo dunque dire che il moto risultante di due moti rettilinei e uniformi è anch'esso rettilineo e uniforme, e si effettua lungo la diagonale del parallelogrammo costruito sui moti componenti presi come lati. E ricordando che nell'esempio addotto i lati AC e AB rappresentano le velocità de' moti componenti, conchiuderemo che *la velocità risultante di due velocità componenti è data in direzione*

e grandezza dalla diagonale del parallelogrammo, che ha per lati le dette velocità.

Servendosi di questa legge, si può trovare la risultante di un numero qualunque di velocità simultanee da cui il mobile potesse essere animato: poichè basterà con la regola suddetta trovare la risultante di due, poi la risultante di questa e della terza, e così via. Ne viene in particolare che la risultante di tre velocità non contenute nello stesso piano, è data dalla diagonale del parallepipedo avente per lati le rette che le rappresentano.

Il teorema del parallelogrammo delle velocità che abbiam detto, vale anche nel caso di moti rettilinei uniformemente accelerati o ritardati. In questi casi il moto risultante è rettilineo, e della stessa natura de' moti componenti; ma quando questi siano di natura diversa, il moto risultante è curvilineo. Nel caso particolare che uno de' moti sia uniforme, e l'altro uniformemente accelerato, il moto risultante è parabolico; esempio, il moto di un proiettile lanciato obliquamente all'orizzonte, o quello dell'acqua che sgorga da un foro praticato nella parete verticale di un vaso, ecc. ecc

34. **Decomposizione di una velocità data in due altre componenti.** — Il problema di trovare la velocità risultante di più velocità componenti da cui un punto è animato, è sempre determinato: non lo è del pari il problema reciproco di sostituire alla velocità effettiva di un punto un sistema di velocità tali, che supposte simultaneamente nel mobile, questo assuma la velocità che realmente ha. V'è un numero infinito di sistemi di componenti che risolvono il problema: affinchè questo sia determinato, è pertanto necessario assegnare alcune condizioni alle quali devono ubbidire le componenti. Sia, per esempio, data la velocità AR (fig. 10), e

vogliamo sostituirle due componenti nelle direzioni $A x$, $A y$. Questa è la condizione che determina il problema: infatti, essendo date le direzioni delle componenti, per avere il valore di queste basterà dall'estremo R della retta $A R$, condurre le $R C$, $R B$ parallele rispettivamente alle direzioni date: si otterrà così il parallelogrammo $A R B C$, di cui i lati $A B$, $A C$ rappresentano le componenti cercate. Infatti se il punto A fosse animato dalle velocità simultanee $A B$, $A C$, la $A R$ sarebbe la sua velocità effettiva o risultante, come sappiamo.

35. **Esempi della composizione di due o più velocità.** — Chiariamo ora con qualche esempio il problema della composizione di due o più velocità.

1.° Siano $A B — C D$ le rive parallele d'un fiume (fig. 11); l'onda del fiume scorre in filetti liquidi parallelamente alle rive nel senso $C D$ con una velocità u che si mantiene costante. Un nuotatore partito dal punto E sulla riva $C D$ traversa il fiume imprimendo al suo corpo una velocità costante v nella direzione $E v$: si vuol sapere in qual punto F il nuotatore raggiungerà la riva opposta. Il movimento del nuotatore rispetto alla riva può essere considerato come un movimento assoluto, facendo astrazione dal moto comune che ha colle rive pel movimento della terra. La velocità effettiva del nuotatore è la risultante della sua propria velocità v per rispetto all'acqua e della velocità di trasporto u dell'acqua medesima. Si otterrà dunque la direzione cercata costruendo il parallelogrammo $E u G v$, di

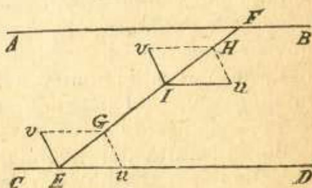


Fig. 11.

cui Eu, Ev rappresentano in direzione e in grandezza rispettivamente la velocità di trasporto dell'acqua e la velocità del nuotatore; la diagonale EG rappresenterà la velocità risultante, ossia la velocità effettiva del nuotatore, e il punto F dove il suo prolungamento incontra la riva AB, indicherà il punto d'arrivo del nuotatore. In un punto qualunque I della traiettoria effettiva EF, la velocità $IH = EG$ sarà dunque la risultante della velocità di trasporto u e della velocità v, la quale ultima solamente costerà fatica a chi nuota.

2.° Supponiamo ora che il nuotatore partendo dal punto E della riva CD si proponga di raggiungere la riva opposta AB nel punto F. Essendo Eu la velocità di trasporto dell'acqua, quale è la direzione della velocità v ch'esso deve imprimere al suo corpo? È evidente che la direzione della velocità deve essere tale che costruendo il parallelogrammo nel punto E sulle componenti u e v prese come lati, la diagonale del parallelogrammo che rappresenta la loro risultante deve passare per F. A tal uopo dalla estremità del segmento Eu che rappresenta la velocità di trasporto u dell'acqua, basterà descrivere una circonferenza col raggio eguale a v, e supposto che essa tagli la EF nel punto G, si tiri la uG che esprimerà in direzione e in grandezza la velocità che il nuotatore deve imprimere al suo corpo.

Se poi il valore della velocità v non fosse preventivamente assegnato, il problema ammetterebbe una infinità di soluzioni: difatti, preso sulla EF un segmento qualunque EG che rappresenti la velocità risultante, e condotta la uG, questa rappresenterebbe l'altra componente v in direzione e in grandezza. Fra le infinite soluzioni, la più favorevole è quella nella quale la velocità v è un minimo, e

per questo basterà dal punto u condurre uG normale a EF; questa normale esprimerà in direzione e in grandezza la velocità più piccola che il nuotatore può imprimere al proprio corpo per raggiungere la riva opposta in F.

36. **Esempi di moto relativo.** — Nel risolvere i problemi del moto di un corpo rispetto ad un altro pur esso in movimento, ossia i problemi del moto relativo, si fa spesso uso del seguente principio che può ammettersi come una verità assiomatica. Il movimento relativo d'un sistema per rapporto ad un altro non è punto alterato, se s'imprime ai due sistemi un movimento comune tale da non alterare la loro reciproca posizione.

I problemi del moto relativo d'un sistema per rapporto ad un altro sono in generale assai complessi: noi ne risolveremo alcuni molto semplici.

1.° Una barchetta si muove in un fiume parallelamente alle rive e con una velocità v, mentre l'acqua del fiume scorre con velocità u. Vogliamo trovare la velocità della barca relativamente a quella dell'acqua: distinguiamo perciò i due casi, che la velocità v della barca abbia una direzione contraria a quella u dell'acqua o la stessa direzione. Supponendo impressa all'acqua e alla barca una velocità comune di trasporto, non si altera punto il loro moto relativo: scegliamo questa velocità eguale e contraria a quella dell'acqua: questa con tale ipotesi è ridotta alla quiete, e la velocità della barca relativa all'acqua sarà $u + v$ nel 1° caso $u - v$ nel 2° caso. Per tale ragione la corrente d'un fiume ci pare più rapida quando con una barca ci moviamo in direzione contraria, e più lenta quando ci moviamo nello stesso senso.

2°. Un uomo fermo deve tenere il suo ombrello verticale, se vuole ripararsi dalla pioggia che cade

verticalmente; ma se cammina in una direzione deve inclinare l'ombrello in questa stessa direzione. Infatti rappresentino Av e Au rispettivamente in direzione e in grandezza la velocità della pioggia e dell'uomo (fig. 12): imprimiamo alla pioggia e all'uomo una velocità comune Au' eguale e contraria alla velocità Au dell'uomo. Con questa ipotesi che non altera il moto relativo della pioggia e dell'uomo, questi diviene immobile, mentre la pioggia possiede le due velocità Av verticale e Au'. La risultante AV di queste due velocità è la velocità relativa della pioggia rispetto all'uomo; ossia tutto avviene come se l'uomo stando fermo, la pioggia cadesse nella direzione AV, sul cui prolungamento deve essere tenuto il manico dell'ombrello.

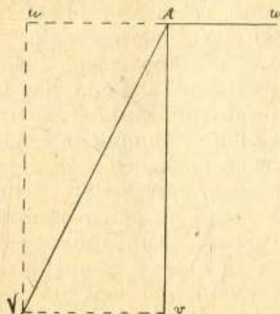


Fig. 12.



3.° Diciamo ancora un altro esempio: supponiamo che sia tirato un colpo di fucile contro un convoglio della ferrovia nella direzione IH (fig. 13) normale alla corsa. La congiungente IE de' due fori operati dalla palla all'entrata e all'uscita non coinciderà con IH, ossia con la direzione della velocità del proiettile, ma il punto E di uscita sarà più lontano del punto I d'entrata dalla locomotiva, a cagione del tempo

occorso al proietto ad attraversare la larghezza del carro; e sembrerà a chi non pone ben mente al fenomeno che il proiettile, anzichè attraversare la larghezza *IH* del carro come è in effetto, abbia invece percorso il cammino obliquo *IE*. Anche qui, a facilitare il problema, si può supporre di comunicare al proiettile e al convoglio una stessa velocità eguale e contraria a quella di quest'ultimo; con ciò non muta la velocità relativa del proiettile rispetto al convoglio. Ma in tale ipotesi il treno resta immobile, e il proiettile è animato da due velocità che possono essere rappresentate dai segmenti *IH* e *HE*; si vede che il moto relativo in questione è rappresentato da *IE*.

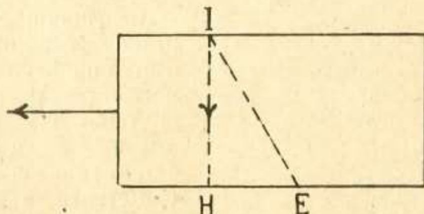


Fig. 13.

37. **Moto rotatorio; velocità angolare.** — Talora il moto di un punto vien riferito, anzichè ad un punto della sua traiettoria, che supporremo piana, ad un altro punto del piano preso fuori d'essa. La retta *OM* che congiunge il punto fisso *O* col punto mobile *M* (fig. 14), è detta *raggio vettore*: si studia come variano col tempo la lunghezza del raggio vettore e l'angolo che esso fa con una direzione fissa. Dividendo l'angolo descritto dal raggio per il tempo impiegato a descriverlo, se il quoziente

si mantiene costante qualunque sia il tempo, la velocità angolare del mobile è data dal quoziente stesso, ed angoli eguali sono descritti in tempi eguali qualunque. Se poi il detto quoziente varia col tempo, esso rappresenta la *velocità angolare media* nell'intervallo di tempo considerato; e se si vuole la *velocità angolare vera* in un istante qualunque, bisogna vedere a qual limite tende il detto quoziente, quando il tempo contato da quell'istante diventa infinitamente piccolo. Si ripeterebbero a tale riguardo tutte le considerazioni fatte pel moto di traslazione.

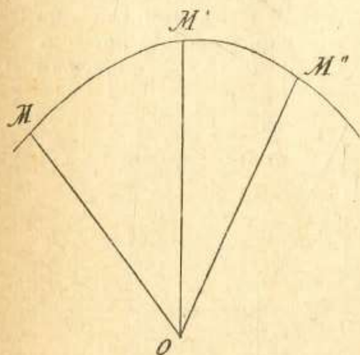


Fig. 14.

Ricordiamo che si prende per misura d'un angolo il rapporto fra l'arco di circonferenza intercettato dai suoi lati e il raggio della circonferenza stessa; questo significa che si assume per *angolo uno* (*radiante*) quello che intercetta un arco eguale al raggio, ossia $180^{\circ} : \pi = 57^{\circ}, 17', 44'', 75$. Pertanto, se un punto descrive con moto uniforme una circonferenza in T secondi, la lunghezza del raggio vettore (raggio del circolo) è sempre la stessa, ed è anche sempre la stessa la velocità angolare intorno al centro, la quale è data da:

$$(1) \qquad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

La velocità angolare ω coincide con la *velocità effettiva* di un punto del raggio vettore, all'unità di distanza dal punto fisso.

Nella pratica si suole spesso indicare la velocità della rotazione col numero n di gradi che il raggio vettore descrive in 1^s; se T è il tempo impiegato in un giro, si ha:

$$n^{\circ} = \frac{360}{T};$$

e la velocità angolare in funzione di n° è data dalla:

$$\omega = \frac{\pi}{180} n^{\circ}.$$

Talora anche la velocità angolare è espressa col numero m di giri che il punto compie in 1^s attorno al centro fisso: dicendo sempre T il tempo di un giro, si ha

$$m = \frac{1}{T};$$

e quindi la velocità angolare in funzione di m è evidentemente data dalla eguaglianza

$$\omega = 2\pi m.$$

Conosciuta la velocità angolare ω, la velocità di un punto alla distanza r dal centro di rotazione è ωr.

38. **Moto di traslazione di un sistema materiale.** — Fin qui abbiamo considerato il moto di un punto: ora vogliamo dare un cenno del movimento d'un sistema materiale. Limiteremo le nostre considerazioni ad un corpo rigido, ad un solido cioè le cui particelle materiali si suppongano invariabilmente connesse fra di loro.

I movimenti semplici di un sistema materiale sono la traslazione e la rotazione, e a queste due specie di movimento possono ridursi tutte le altre.

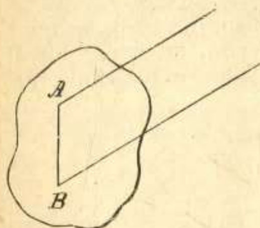


Fig. 15.

Il *moto di traslazione* rettilineo o curvilineo d'un sistema rigido può definirsi quel moto, nel quale una linea retta AB (fig. 15) che congiunge due punti qualunque del corpo resta parallela a sè stessa durante il movimento; onde è evidente che i punti del corpo descriveranno traiettorie eguali e sovrapponibili. Una traslazione di un corpo rigido è quindi conosciuta, quando è data, in ogni istante, la direzione e la grandezza della velocità di uno de' suoi punti.

39. **Moto rotatorio di un sistema materiale.** — Nel moto rotatorio di un corpo rigido, tutti i suoi punti descrivono altrettante circonferenze in piani perpendicolari ad una stessa retta chiamata *asse di rotazione,* sulla quale ciascuna ha il suo centro. È evidente che tutti i punti del corpo rotante hanno nello stesso istante la medesima velocità angolare, (§ 37), ma velocità effettiva maggiore quelli che sono più discosti dall'asse di rotazione; e propriamente se ω è in un dato istante la velocità angolare del sistema, la velocità effettiva d'un punto che si trova alla distanza r dall'asse è:

$$v = \omega r = \frac{2\pi}{T} r.$$

La terra compie una rotazione con moto uniforme in 24 ore sideree, e però ha una velocità angolare

di 15° in 1^h, ossia di 15″ in 1^s sidereo. Prendendo come unità del tempo il minuto secondo sidereo, si ha:

$$\omega = \frac{2\pi}{24 \times 60 \times 60} = 0^m,0000727;$$

ossia un punto della terra, alla distanza di 1^m dall'asse, descrive in 1^s sidereo $0^{mm},0727$; nel mentre un punto dell'equatore descrive nel medesimo tempo un cammino eguale a:

$$0^{mm},0727 \times 6378233 = 463^m;$$

essendo 6378233^m il raggio equatoriale.

40. **Composizione dei moti rotatori.** — Una rotazione è conosciuta quando è data la posizione vera dell'asse intorno al quale si effettua, la velocità angolare e il senso del movimento. Ora questi tre elementi che individuano una rotazione possono essere rappresentati da un segmento rettilineo *LM* (fig. 16), convenendosi che la rotazione si effettui intorno all'asse geometrico *LM*, e che la sua lunghezza *LM* rappresenti la velocità angolare della rotazione. Non resta che a fissare il senso della rotazione; per ciò si conviene di dare all'asse *LM* una direzione tale che un osservatore il quale avesse i piedi in *L* e la testa in *M*, vedrebbe rotare il corpo da sinistra a destra; nel caso della figura la rotazione avviene nel senso della curva *F*.

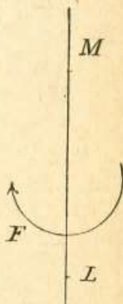


Fig. 16.

S'intenderà dunque per *asse d'una rotazione* un segmento preso sull'asse geometrico intorno a cui il sistema ruota, eguale in lunghezza alla velocità

angolare, e diretto in un senso tale che un osservatore sdraiato lungo l'asse nel modo ora detto veda il sistema rotare da sinistra a destra.

Ciò posto, vediamo come due moti rotatori si possano comporre in un sol moto rotatorio risultante.

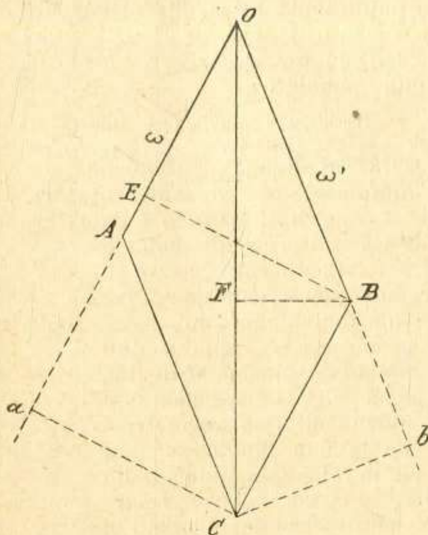


Fig. 17.

Proponiamoci ad esempio di trovare la rotazione risultante di due rotazioni, i cui assi sieno concorrenti. Siano OA, OB, secondo la detta convenzione, le rotazioni componenti ω e ω' (fig. 17): ciascuno cioè rappresenti la direzione intorno alla quale il corpo è sollecitato a ruotare, la grandezza e il

senso della velocità angolare. Il punto O d'incontro non subendo alcuno spostamento per le rotazioni componenti, poichè fa parte di ciascuno dei due assi, non verrà spostato neppure dalla rotazione risultante: ora si deve dimostrare che la diagonale OC del parallelogrammo costruito sulle rotazioni componenti OA, OB, rappresenta l'asse, la grandezza, e il senso della rotazione risultante.

Bisogna anzitutto far vedere che la diagonale OC resta immobile per effetto delle due rotazioni ω ed ω' che si effettuano rispettivamente intorno agli assi OA, OB; all'uopo basterà dimostrare che il punto C resta fisso. Abbassiamo da C le due normali Ca, Cb sulle direzioni OA, OB: per effetto della rotazione ω il punto C dovrebbe abbassarsi nel tempuscolo τ sotto il foglio d'una quantità $\omega \times \tau \times Ca$, mentre per effetto della rotazione ω' dovrebbe nello stesso tempo innalzarsi sul piano del foglio d'una quantità $\omega' \times \tau \times Cb$: il punto C resterà dunque immobile, se si ha l'eguaglianza:

$$\omega \times Ca = \omega' \times Cb;$$

od anche

$$OA \times Ca = OB \times Cb,$$

la quale è evidentemente soddisfatta, poichè il primo membro è il doppio dell'area del triangolo OAC, e il 2° il doppio del triangolo OBC, i quali sono eguali come metà ciascuno del parallelogrammo. Pertanto O e C restando fissi, la diagonale OC è la direzione dell'asse della rotazione risultante.

Resta ora a provarsi che essa ne rappresenta ancora la grandezza Ω. A tal fine consideriamo il movimento d'un punto qualunque B dell'asse OB, il quale non subisce alcuno spostamento in virtù della rotazione ω', giacchè si trova sull'asse di questa rotazione. I suoi spostamenti devono dunque

esser gli stessi, sia per effetto della rotazione ω che si effettua intorno ad OA, sia per effetto della rotazione Ω che si effettua intorno ad OC. Abbassiamo da B la perpendicolare BE sulla OA e la perpendicolare BF sulla OC: in virtù della rotazione $\omega = OA$, il punto B, in un tempuscolo τ, si sposta perpendicolarmente al piano del foglio e sotto di questo d'una quantità eguale a $\omega \times \tau \times BE$; in virtù della rotazione Ω intorno ad OC, esso si sposta, nello stesso tempo, d'una quantità $\Omega \times \tau \times FB$ e nello stesso senso. Si dovrà dunque avere:

$$\omega \times BE = \Omega \times BF. \tag{1}$$

Ma $\omega = OA$, e il prodotto $\omega \times BE = OA \times BE$ misura l'area del parallelogrammo $OACB$: analogamente anche il prodotto $OC \times BF$, essendo il doppio dell'area del triangolo OCB, è eguale all'area del parallelogrammo; onde:

$$OA \times BE = OC \times BF. \tag{2}$$

Confrontando la (2) colla (1) si vede che, essendo $\omega = OA$, deve essere $\Omega = OC$, come si voleva dimostrare.

Dunque, *la rotazione risultante di due rotazioni componenti ad assi concorrenti è rappresentata in direzione, senso e grandezza dalla diagonale del parallelogrammo costruito sugli assi che rappresentano le rotazioni componenti.*

11. **Oggetto della Dinamica; leggi fondamentali.** — Mentre la Cinematica considera il moto sotto un aspetto puramente geometrico, servendosi delle sole nozioni dello spazio e del tempo, la Dinamica studia il moto dei corpi reali, tenendo conto della loro massa e delle forze che sono le cause efficienti del moto. Volendo considerare anche que-

ste condizioni, è necessario ricorrere ad alcuni *principi o leggi fondamentali*, che in seguito alla osservazione dei fatti e alla esperienza furono stabiliti da alcuni sommi filosofi naturalisti, fra i quali primi Galileo e Newton, che possono riguardarsi come i veri fondatori della Dinamica.

Siffatti principi non hanno lo stesso grado di evidenza degli assiomi della Geometria; essi trovano la loro dimostrazione *a posteriori*, nei fatti cioè che direttamente vi si riferiscono, e nella esattezza delle conseguenze che se ne possono logicamente dedurre

12. **Legge d'inerzia.** — La prima di dette leggi che l'esperienza insegna è quella d'*inerzia*, la quale può enunciarsi così: *un corpo qualunque, non dotato di vita, persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo e uniforme, finchè non agisca su esso qualche causa esterna.*

Questa legge nella sua sostanza è dovuta a Leonardo da Vinci.

Che un corpo in quiete, lasciato a sè, rimanga in quiete, è cosa evidente e lo constatiamo a ogni momento; ma non è del pari evidente che un corpo in moto tenda a conservare inalterato il proprio moto, ossia tenda a mantenere la stessa direzione del movimento e la stessa velocità: che anzi vediamo di continuo corpi in moto cambiare di direzione, e ora andar più veloci, ora meno. Tuttavia un esame attento delle circostanze nelle quali siffatte variazioni si verificano, ci farà accorti che ciò non accade per virtù propria de' corpi, ma sotto l'influenza di qualche causa esterna. Così, per esempio, una palla che messa in moto si ferma presto su un terreno scabro, si muove più a lungo sul panno del bigliardo, e ancora di più sopra un piano di ghiaccio, e il suo moto con-

tinuerebbe indefinitamente se non incontrasse alcuna resistenza di *attrito*.

Una ruota girevole intorno ad un asse che l'attraversa nel centro, se è messa in moto per una causa esterna qualunque ed è poi lasciata libera, va mano a mano rallentando il suo moto, fino a fermarsi del tutto. Quale è qui la causa dello spegnersi del movimento? Si vede subito che è dovuta agli ostacoli che altri corpi oppongono al moto della ruota; così l'asse di rotazione, dovendo essere sostenuto, sfrega ne' sostegni che non possono essere mai perfettamente lisci (attrito); di poi v'è la resistenza dell'aria attraverso la quale i corpi in moto devono aprirsi la via. L'esperienza ci insegna che, diminuendo tali ostacoli o resistenze esterne, il movimento della ruota si mantiene, come quello della palla dell'esempio precedente, più a lungo inalterato.

Diciamo un altro esempio: un corpo abbandonato a sè, ad un'altezza qualunque dal suolo, cade, si muove cioè senza bisogno di un impulso: a che cosa deve attribuirsi tale movimento? s'intende subito ch'esso è dovuto alla gravità, all'attrazione cioè che la terra esercita sui corpi posti alla sua superficie. Se questa non fosse, il corpo non cadrebbe, e non vi sarebbe ragione d'ammettere che esso avesse a muoversi in una o in un'altra direzione.

Se un corpo non può mettersi in moto da sè, e non può, essende in moto, variare la direzione e la grandezza della velocità, ne viene che il moto di un corpo, sottratto ad ogni influenza esterna, deve necessariamente essere rettilineo e uniforme. Questa è una conseguenza immediata della legge d'inerzia: secondo questa legge, ogni volta che osserviamo variare lo stato di quiete o di moto di un

corpo, noi dobbiamo pensare che una o più cause agiscono su esso per produrre un tale effetto. A siffatte cause, qualunque sia la loro natura, si dà il nome di *forze:* sono altrettante forze il peso dei corpi, l'attrito, la forza muscolare, l'attrazione magnetica, l'attrazione elettrica, ecc. I loro effetti poi sono svariati: talora due o più forze si neutralizzano lasciando inalterato lo stato di quiete o di moto di un corpo, si dice allora ch'esse *si fanno equilibrio;* ora fanno mutare la forma e il volume de' corpi; ora li mettono in moto, li fermano, li accelerano o ritardano o deviano, e tutte queste variazioni possono operarle lentamente o in modo repentino.

Alcune forze si esercitano direttamente sopra tutte le molecole di un corpo, come la gravità; altre sui punti soltanto della superficie; altre finalmente su alcuni punti separati. Un corpo qualunque essendo formato da una riunione di punti (molecole), costituisce di per sè un sistema materiale; se poi si avrà a considerare un insieme di corpi, si avrà un sistema materiale più complesso: esempio, il sistema solare. Ora le forze che agiscono su un dato sistema, si dicono *forze interne* se si esercitano fra le parti dello stesso sistema: le attrazioni fra il sole e i pianeti nel sistema solare, le attrazioni fra le molecole di un corpo, sono esempi di forze interne di tali sistemi. Invece le forze che si esercitano fra il sistema e i corpi che non ne fanno parte, son dette *forze esterne.* Questo nel caso de' sistemi liberi: quando poi il sistema avesse punti fissi, o legami di qualunque natura, bisognerà considerare anche le forze che da essi derivano, e queste son dette *forze passive.*

Per intendere in qual modo avvenga la trasmissione delle reciproche azioni fra i corpi, bisogna

ricordare la ipotesi fatta intorno alla loro costituzione. Noi dicemmo essere i corpi costituiti da un numero infinitamente grande di particelle materiali estremamente piccole dette molecole, poste a distanze del medesimo ordine di grandezza delle loro dimensioni, dotate di movimento e soggette a reciproche attrazioni. Siffatte mutue azioni sono le *forze molecolari:* esse determinano le varie coerenze de' corpi, e cambiano ad ogni minimo spostamento delle molecole stesse: ove poi una causa esterna modifichi la configurazione del corpo, in virtù delle azioni suddette le molecole *tendono* a riprendere le primitive posizioni, sia avvicinandosi, sia allontanandosi, e si suscitano per tal guisa delle reazioni che fanno equilibrio alle forze esterne. Al cessare di queste, le forze interne (forze molecolari) mettono in moto le molecole e le riducono difatti nelle loro posizioni primitive *(elasticità)*, se però non si sarà oltrepassato un certo limite *(limite di elasticità)*, nel qual caso il corpo resta deformato o si spezza. Se dunque una forza agisce direttamente su una particella d'un corpo, questa subirà uno spostamento rispetto alle più vicine, le quali alla loro volta provocheranno degli spostamenti nelle più lontane, per modo che l'azione esterna, in virtù delle forze interne, si distribuirà egualmente in tutto il corpo, finchè si manifesterà una tensione o una pressione là dove il corpo è tenuto fisso, oppure il corpo si metterà in moto.

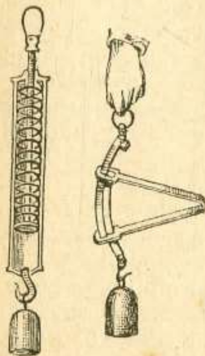
Ma il più delle volte si tratta di corpi solidi che si deformano pochissimo, in modo da poterne trascurare gli spostamenti delle parti; i quali però, sebben piccoli, avvengono sempre, e sono necessari alla comunicazione delle forze e del moto. Tali solidi poco deformabili sono spesso, per semplicità, considerati come corpi *rigidi*, di forma cioè invariabile.

Dalle cose dette si deduce che le forze per operare sui corpi richiedono un certo tempo, e *forze istantanee* vere e proprie non esistono, perchè l'istante è, rispetto al tempo, ciò che il punto è rispetto alla linea.

Quando una forza produce un brusco cambiamento di velocità, vuol dire che si tratta di una forza intensissima che agisce per un intervallo di tempo piccolissimo; esempio, il moto de' proiettili dovuto all'enorme tensione de' gas che si producono coll'accensione della polvere nei fucili, o nei cannoni. Se una palla di fucile può forare un vetro senza mandarlo in pezzi, è segno che non vi fu tempo bastevole perchè il moto si trasmettesse alle parti più lontane. Una sfera metallica pesante sia sospesa mediante un filo e da essa penda un identico filo con un'impugnatura: se si tira l'impugnatura a poco a poco, si rompe il filo superiore; ma se invece si dà uno strappo repentino, si rompe l'inferiore, perchè il moto non ha potuto comunicarsi per mezzo della sfera al filo superiore. Una moneta si tenga ritta pel taglio su un piano orizzontale: se tra lei e il piano si colloca una strisciolina di carta, che poi si tira con uno strappo brusco, la striscia esce di sotto alla moneta e questa non cade, perchè il tempo non fu sufficiente alla comunicazione del moto dalla carta alla moneta.

Mentre stiamo in piedi su una carrozza ferma, cadiamo nel senso opposto al moto se essa si muove improvvisamente: difatti ci vuole un certo tempo prima che si comunichi il moto dai piedi alla testa; questa perciò rimarrà più indietro, e andando fuori della verticale, siccome quella che è relativamente più pesante, provocherà la caduta. Se il treno invece si ferma d'un tratto, siamo per inerzia sbalzati innanzi.

43. **Misura pratica delle forze; dinamometri.** — L'idea di forza si collega con la sensazione che proviamo tirando o sospingendo qualche cosa, esercitando cioè una trazione o pressione, in generale, uno sforzo; e poichè nel reggere un peso esercitiamo pure uno sforzo, si capisce subito che le forze possono paragonarsi ai pesi, e farne la misura confrontandole con questi. Praticamente si prende per unità di forza la pressione esercitata da un chilogrammo, che, senza errore sensibile, possiamo ritenere la stessa da per tutto; e per stabilire il confronto tra diverse forze servono utilmente i *dinamometri.* Se ne costruiscono di diversa forma, ma tutti si riducono in fondo ad una molla di acciaio, la cui maggiore o minore deformazione dovuta alla forza operante, è indicata da un indice che si muove dinanzi ad una scala ottenuta per via d'esperienza: le figg. 18 e 19 ne rappresentano due. Prima però di servirsi di un dinamometro, è prudente di rivederne la graduazione, facendovi agire pesi conosciuti, per vedere se la elasticità della molla si sia mantenuta inalterata.


Fig. 18. Fig. 19.

Ora, con un dinamometro sensibilissimo, si potrebbe constatare questo fatto interessante, che uno stesso corpo applicato ad esso dà indicazioni diverse nei diversi paesi; e propriamente si può a questo modo verificare che un corpo pesa di più mano a mano che si procede dall'equatore verso i poli: vedremo in seguito la ragione di questo fatto,

ma è bene sapere fin d'ora che il chilogrammo non è, a tutto rigore, una unità di forza sempre la stessa ne' diversi paesi.

44. **Chilogrammo; suoi multipli e sottomultipli.** — Il chilogrammo viene definito il peso di 1 decimetro cubo d'acqua distillata, alla temperatura di 4°. Per rappresentarlo fu costruito un cilindro di platino: ma poichè misure assai precise hanno dimostrato che il peso di detta massa non corrisponde esattamente alla definizione, sarà meglio definire il chilogrammo secondo il prototipo internazionale che si conserva nell'Ufficio internazionale già ricordato dei pesi e delle misure.

Il *grammo* è la millesima parte del chilogrammo: i multipli e sottomultipli del grammo sono i seguenti:

t.	Tonnellata	1000000
q.	Quintale	100000
—	Miriagrammo	10000
kg.	Chllogrammo	1000
—	Ettogrammo	100
—	Decagrammo	10
g.	Grammo	1
dg.	Decigrammo	0,1
cg.	Centigrammo	0,01
mg.	Milligrammo	0,001.

45. **Caratteri di una forza e sua rappresentazione grafica.** — Data l'intensità di una forza qualunque, quando siano altresì note la direzione secondo cui essa agisce, e la posizione del punto cui è applicata, si ha quanto occorre per definirla.

I caratteri di una forza sono quindi la sua intensità, la direzione, il punto di applicazione. Questi tre caratteri di una forza si rappresentano col

mezzo d'un segmento di retta come AB (fig. 20), intendendosi che l'estremo A di esso sia il punto di applicazione, cioè il punto materiale sul quale la forza agisce; la sua direzione AB nel verso della freccia indichi la direzione della forza, ossia quella che prenderebbe il punto di applicazione se le ubbidisse liberamente; la lunghezza poi del segmento AB esprima l'intensità, prendendolo in ogni caso proporzionale a questa. A tale uopo si stabilisce per convenzione una scala opportuna: per esempio, se un decimetro rappresenta un chilogrammo un segmento di due, tre, ecc. decimetri rappresenterà una forza di due, tre, ecc. chilogrammi.



Fig. 20.

46. **Seconda legge della Dinamica.** — La legge d'inerzia insegna che ogni variazione nello stato di quiete o di moto di un corpo è necessariamente dovuta a qualche causa esterna, o forza che su esso agisce. È naturale quindi di paragonare fra loro le forze dagli effetti o variazioni di moto che esse producono, e propriamente si ritiene che « *ogni variazione di moto è proporzionale alla forza agente, ed avviene nella direzione della retta lungo la quale la forza agisce* ».

Questa legge, nella sostanza, è dovuta a Galileo che l'illustrò con numerose osservazioni ed esperienze; l'enunciato però è del Newton. Per l'intelligenza di questa legge cominciamo coll'osservare che, se si tratta sempre dello stesso corpo, per variazione di moto in una data direzione non si può intendere altro che la variazione della velocità (accelerazione) in quella direzione. Ciò posto, sup-

poniamo che la forza che agisce sul corpo sia una *forza costante*, una forza cioè che mantenga sempre la stessa direzione e la stessa intensità; se diciamo c l'accelerazione che essa è capace d'imprimere al corpo nell'unità di tempo, allora, poichè una forza costante comunicherà al medesimo corpo sempre la stessa accelerazione, la variazione di velocità alla fine del tempo t sarà eguale a $c\,t$; e se il mobile aveva la velocità iniziale u, la sua velocità alla fine del tempo t sarà:

$$v = u \pm c\,t,$$

secondo che la forza agirà nello stesso verso della velocità iniziale o nel verso contrario. Per tanto il movimento prodotto da una forza costante su di un corpo libero è *uniformemente vario,* sempre che la forza agisca nella direzione del moto. Reciprocamente, se il movimento rettilineo di un corpo è uniformemente vario, la forza che lo sollecita è costante ed agisce nella direzione del moto.

17. **Massa.** — La 2ª legge della dinamica ci dà ancora il modo di fare la misura delle forze per mezzo degli effetti di moto che esse producono agendo sui corpi: al quale fine ci conviene introdurre nel nostro studio anche la materia che compone il corpo che si muove.

Deriva dalla legge suddetta che due forze sono eguali, ossia hanno eguale intensità, allorchè agendo separatamente e in modo costante su uno stesso mobile, per uno stesso tempo, gli imprimono una eguale velocità, ossia una stessa accelerazione; e in generale, le intensità relative di due forze costanti sono direttamente proporzionali alle velocità o alle accelerazioni impresse da ciascuna allo stesso mobile, sul quale abbiano agito per egual tempo.

Così, se c è l'accelerazione impressa ad un dato corpo A da una forza costante d'intensità F, e c' l'accelerazione impressa allo stesso corpo da un'altra forza costante F', stando al principio suddetto sarà:

$$F : F' = c : c';$$

od anche:

$$\frac{F}{c} = \frac{F'}{c'}.$$

Ora supponiamo che le medesime forze F e F' agiscano su un altro corpo B, e gli imprimano rispettivamente le accelerazioni f e f'; si avrà analogamente:

$$\frac{F}{f} = \frac{F'}{f'}. \tag{1}$$

Se le accelerazioni acquistate dal corpo B sono diverse da quelle acquistate dal corpo A, per esempio minori, vorrà dire che B oppone maggiore inerzia al cambiamento di velocità, ossia che ha maggior *massa:* se invece le f e f' sono rispettivamente eguali alle c e c' i corpi A e B oppongono all'azione delle forze la stessa inerzia, ossia hanno masse eguali.

Difatti, noi concepiamo necessariamente che la differente inerzia opposta dai diversi corpi al cambiamento della loro velocità, non può dipendere da altro che da una certa quantità intimamente unita ad essi, la quale ne costituisce — per così dire — la stessa essenza, quantità che per un dato corpo rimane invariabile se il corpo rimane lo stesso, e che ne definisce appunto la *massa.*

In generale, si prende come valore della massa di un corpo il quoziente dell'intensità di una forza costante agente su esso per l'accelerazione che questa gli imprime, e *si conviene* che la massa misuri la quantità di materia del corpo.

Or dunque, se c è l'accelerazione che una forza costante di intensità F imprime ad un corpo, la massa m di questo è data dalla relazione:

$$m = \frac{F}{c}.$$

La definizione suddetta della massa non implica punto che i corpi debbano avere la stessa costituzione chimica; è poi evidente che quando un corpo risulterà formato dalla riunione di più corpi, la sua massa sarà la somma delle masse dei corpi componenti.

48. **Impulso; quantità di moto.** — Si deduce dalla relazione precedente che:

$$F = M c, \qquad (2)$$

ossia una forza è misurata dal prodotto della massa su cui agisce per l'accelerazione che le imprime. Se questa forza costante agisce per il tempo t, la velocità impressa alla massa sarà $v = c\, t$, e si potrà scrivere:

$$F t = M v. \qquad (3)$$

Il prodotto $F t$ della forza per la durata della sua azione è detto *impulso della forza*. E chiamando *quantità di moto* il prodotto di una massa per la sua velocità, possiamo dire che *l' impulso di una forza è eguale alla quantità di moto che è capace di comunicare*. Dalla (3) si deduce che forze agenti per tempi eguali sono proporzionali alle quantità di moto che imprimono; ed anche che, per imprimere la stessa velocità a masse diverse, si richiedono forze proporzionali alle masse, se la durata d'azione è la stessa. La (2) ci fornisce il modo di valutare la massa d'un corpo qualunque: basterà

all'uopo farvi agire una forza conosciuta, e misurare la corrispondente accelerazione prodotta. Questa esperienza si fa comodamente ricorrendo alla gravità: dicendo P il peso d'un corpo, M la sua massa e g l'accelerazione di gravità, si ha:

$$P = M g;$$

dividendo quindi il peso del corpo che è la forza, per l'accelerazione di gravità che è la stessa per tutti i corpi nel medesimo luogo (§ 72), si ottiene la sua massa. L'accelerazione di gravità alle nostre latitudini è di circa $9^m,80$.

49. **Unità di misura; sistema C. G. S.** — Nella (3) entrano quattro grandezze: la forza F, il tempo t della sua azione, la massa M su la quale essa agisce, la velocità v impressa; ed essendovi tra esse la relazione suddetta, si potranno scegliere ad arbitrio le unità per la misura di tre soltanto, che saranno le unità fondamentali, la quarta ne risulta di conseguenza. In generale, dalle tre unità fondamentali dipendono poi tutte le altre unità (unità derivate) per la misura delle diverse grandezze.

Si scelsero dapprima le seguenti unità: il metro per la misura della velocità, il minuto secondo per la misura del tempo, il peso del chilogrammo per la misura della forza: l'unità di massa in tale sistema è quella a cui la forza di 1 chilog. imprime in 1^s la velocità di 1^m. Se non che questo sistema venne nella scienza abbandonato, perchè il peso del chilog. varia col variare della gravità nei diversi luoghi. È vero che siffatte variazioni sono piccole e in molti casi trascurabili, ma a raggiungere una maggiore esattezza si è convenuto di adottare come unità fondamentali queste altre tre: il centimetro per la misura delle lunghezze, e quindi della velocità e dell'accelerazione; la *massa del*

grammo per la misura della massa dei corpi; il minuto secondo, come prima, per la misura del tempo. Queste tre unità sono ben definite, e le stesse in ogni luogo. Tale sistema di misura è detto sistema centimetro-grammo-secondo, e s'indica col simbolo *C. G. S.*

L'unità derivata per la forza è detta *dina;* essa è la forza costante che agendo per 1^s su la massa di 1 grammo, le imprime la velocità di 1 cm.

E poichè il peso di 1 grammo imprime alla propria massa, alla nostra latitudine, la velocità di 980 centim. in 1^s, si vede che il peso di 1 grammo equivale a 980 dine; se ne deduce che 1 kg. $= 9{,}8 \cdot 10^5$ dine [1].

Le unità geometriche derivate sono il cm.^{2} e il cm.^{3} rispettivamente per le misure delle aree e dei volumi.

50. **Densità.** — Si intende per *densità* di un corpo la massa dell'unità di volume; cosicchè indicandone con M la massa e con V il volume, la densità d sarà:

$$d = \frac{M}{V}.$$

Ora essendo il peso specifico assoluto dello stesso corpo dato dalla relazione

$$p = \frac{P}{V},$$

dove P è il suo peso, si vede subito che

$$p = d \cdot g;$$

vale a dire il peso specifico assoluto è eguale alla densità moltiplicata per l'accelerazione di gravità.

[1] Il numero 10^5 è 100000, ossia 1 seguito da tanti zeri quanto è l'esponente: così dicasi negli altri casi.

Ma se in luogo del peso specifico e della densità assoluti, si considerano il peso specifico e la densità relativi all'acqua (§ 19), si vede che questi sono espressi dallo stesso numero.

51. **Indipendenza degli effetti delle forze; parallelogrammo delle forze.** — Il ragionamento da noi fatto al § 46 presuppone che *l'effetto di una forza su di un corpo è indipendente dal movimento anteriormente acquistato:* e difatti l'esperienza e l'osservazione insegnano che l'accelerazione prodotta da una forza è indipendente dallo stato che precede la sua azione, e dalle accelerazioni che altre forze potrebbero contemporaneamente produrre. Se ne deduce che, quando più forze agiscono contemporaneamente sullo stesso corpo, ciascuna di esse produrrà lo stesso effetto come se fosse sola; o, in altre parole, come se le stesse forze agissero non contemporaneamente, ma successivamente l'una all'altra, senza disturbarsi reciprocamente nella loro azione. Cosicchè un corpo libero sollecitato simultaneamente da varie forze, si troverà dopo un tempo qualunque nel medesimo luogo dello spazio, dove pure si troverebbe, qualora gli stessi movimenti impressi dalle forze si effettuassero separatamente l'uno dall'altro. Questa conseguenza della seconda legge della dinamica, è il principio di Galileo della *indipendenza degli effetti delle forze.* Per maggior chiarezza, spieghiamolo con un esempio: supponiamo che a un punto A in quiete sieno applicate due forze costanti P_1, P_2 agenti rispettivamente nelle direzioni AB, AC (fig. 21), e supponiamo che i due segmenti AB,

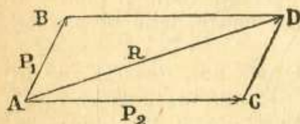


Fig. 21.

A C rappresentino rispettivamente gli spazi che quel punto percorrerebbe in un secondo per effetto delle forze date, se ciascuna agisse da sola, e perciò anche le accelerazioni impresse.

Ora noi sappiamo (§ 33) che il mobile si troverà alla fine dello stesso tempo in *D*; ossia la diagonale *A D* del parallelogrammo rappresenterà lo spazio realmente percorso da *A* per l'azione simultanea di quelle due forze. E poichè le forze che agiscono su uno stesso punto stanno fra di loro come le accelerazioni che gli comunicano, i lati del parallelogrammo, invece di rappresentare spazi o accelerazioni possono rappresentare le forze acceleratrici P_1, P_2 agenti sul punto, e la diagonale allora rappresenterà in grandezza e direzione la *forza risultante,* una forza cioè che da sola produrrebbe esattamente lo stesso effetto di quelle date.

Dunque, *se si costruisce un parallelogrammo di cui due lati contigui rappresentano in direzione e grandezza due forze agenti sullo stesso punto* (forze componenti), *la diagonale di questo parallelogrammo rappresenterà in direzione e grandezza la forza risultante.*

Vedremo in seguito una verifica sperimentale di questo importantissimo enunciato (§ 54).

52. **Scalari e vettori; somma di più vettori.** — Crediamo utile di dire sin d'ora che le grandezze si distinguono in *scalari* e *vettori:* si dice scalare una quantità, se a definirla basta assegnare la *specie* e darne il *valore* col numero (intiero, frazionario, irrazionale, positivo o negativo) che esprime il rapporto fra essa e un'altra grandezza della stessa specie assunta come unità; ne sono esempi il tempo contato da un certo istante preso come origine, il volume di un corpo, la massa, la temperatura, ecc., ecc. A definire invece un vet-

tore, bisogna assegnare oltre alla specie e al numero che lo misura, anche la sua *direzione* e il *verso:* sono esempi di vettori la velocità, l'accelerazione, la forza, ecc., ecc.; essi si possono tutti rappresentare per mezzo di un segmento rettilineo (fig. 20) il quale con la sua direzione, verso e grandezza rappresenta un vettore qualunque, come si è detto nel caso delle velocità, delle accelerazioni, delle forze. Due segmenti che rappresentano due vettori di una medesima specie sono eguali, se hanno lo stesso valore, la stessa direzione e lo stesso verso, qualunque ne sia l'origine o il punto da cui si comincia a contarli.

Ora ricordando i teoremi del parallelogrammo delle velocità, delle accelerazioni, delle rotazioni, delle forze, possiamo dire in generale: *se due lati di un parallelogrammo rappresentano due vettori componenti, la diagonale contata dalla stessa origine è il vettore risultante.* Analogamente, *se i lati di una linea poligonale rappresentano altrettanti vettori componenti* (velocità, accelerazioni, forze, ecc.), *il segmento che chiude la linea poligonale è il vettore risultante.* Così pure, dato un *vettore* si può decomporlo in due o più componenti secondo determinate direzioni.

Il vettore risultante di due o più vettori componenti è considerato come la *somma geometrica* de' vettori stessi, per distinguerla dalla somma aritmetica, ossia dalla somma ordinaria; così, per esempio, il vettore rappresentato dal segmento che chiude la linea poligonale della fig. 23, i cui lati sono paralleli ed eguali in valore ai vettori dati, è la loro somma geometrica. La somma geometrica è eguale alla somma aritmetica solo quando i vettori componenti hanno la stessa direzione; se poi essi, pur avendo la stessa direzione, hanno segni

contrari, la somma geometrica coincide con la somma algebrica.

53. **Legge dell'azione e reazione.** — Abbiamo già accennato alle mutue azioni che si esercitano fra due corpi, quando l'uno agisce su l'altro per modificarne lo stato di quiete o di moto (§ 42). Si deve a Newton il seguente principio che regola le reciproche azioni fra due porzioni di materia, e che costituisce la 3ª legge della dinamica: « *ad ogni azione vi è sempre una reazione eguale e contraria;* ossia *le azioni scambievoli di due corpi sono sempre eguali e direttamente opposte sulla medesima linea retta* ». È implicito nell'enunciato che l'azione e la reazione cominciano e cessano insieme. E una legge, come le altre due, fondata sulla osservazione e sulla esperienza; stando ad essa dunque, se un corpo *A* agisce su di un corpo *B*, questo a sua volta agisce su *A* in senso contrario e con la stessa forza. Gli esempi sono innumerevoli; diciamone alcuni.

Prendiamo una verghetta di acciaio e flettiamola; sentiremo lo sforzo che fa la molla per ritornar retta.

Si introduca in un cilindro cavo uno stantuffo a tenuta di gas, tale cioè che, potendo affondarsi più o meno, impedisca alla massa d'aria sottoposta di sfuggire tra le pareti sue e quelle del cilindro, come nell'esperienza del § 1. Premendo sullo stantuffo, esso si abbasserà comprimendo la massa d'aria; allora questa entra in tensione e premerà in ogni verso; la pressione contro lo stantuffo è la reazione che si renderà subito manifesta se abbandoniamo a sè stesso lo stantuffo, perchè lo vedremo rimontare.

Se carichiamo un tavolo di pesi, i suoi piedi per la pressione si accorceranno sebbene di poco, ed eserciteranno per elasticità due forze eguali ed opposte, una (l'azione) contro il suolo, l'altra (la

reazione) contro i pesi. Nelle identiche condizioni del tavolo carico di pesi si trova un uomo che sopporta un fardello; i suoi muscoli si tendono, e lo sforzo che fa di basso in alto per sostenere il carico, l'esercita del pari sul suolo che lo sostiene.

Un uomo entro una barchetta su un lago tranquillo non riuscirà, senza remo o vela o altro motore, a spostare la barca, perchè spingerà innanzi con le mani la barca tanto, quanto la spingerà indietro co' piedi.

Quando si spara un'arma da fuoco, la palla si muove in un senso (azione), l'arma rincula (reazione): i due impulsi sono eguali, e quindi eguali sono le quantità di moto de' due corpi; ossia, il prodotto della massa del proiettile per la sua velocità è eguale al prodotto analogo della massa dell'arma per la velocità di questa.

La terra attira una pietra collocata in alto con una forza che è eguale al peso della pietra; ebbene dobbiamo ritenere che la pietra con egual forza attiri la terra; — e quando la pietra cade verso la terra, questa cade verso la pietra; ma essendo le velocità acquistate in ragione inversa delle masse rispettive, il moto della terra risulta infinitamente piccolo e quindi trascurabile. In Fisica non mancano frequenti esempi di azioni e reazioni eguali e contrarie: la calamita attira il ferro, ma questo a sua volta attira quella; se uno dei due corpi è fisso, l'altro gli viene incontro; se entrambi sono mobili, si spostano tutti e due per venire a contatto.

54. **Equilibrio delle forze. Statica.** — Vediamo ora quali sono le condizioni alle quali devono soddisfare le forze agenti su di un corpo, affinchè si facciano equilibrio, affinchè cioè lascino inalterato lo stato di quiete o di moto del corpo sul quale

agiscono: la parte della meccanica che studia questo problema è detta *Statica*. Bisognerà distinguere il caso che il corpo, al quale sono applicate le forze, sia perfettamente *libero*, dal caso che abbia dei *legami;* abbia, per es., un punto fisso, o sia costretto a ruotare intorno ad un asse, o a restare su di un piano, ecc. È evidente che l'equilibrio si verificherà ogni volta che una forza tenda a produrre, in senso contrario, lo stesso effetto di tutte le altre. Si presenta così il problema della *composizione delle forze*, di determinare cioè una forza unica, detta *risultante,* che sostituita a più altre dette *componenti,* produca lo stesso effetto di queste. Il teorema fondamentale che serve alla risoluzione di questo problema, è quello del parallelogrammo delle forze (§ 51).

Per maggiore certezza, verifichiamo quella deduzione con una esperienza. Siano tre fili in un piano verticale riuniti in un sol punto O (fig. 22): due passano sulle gole delle puleggie G, K e sono tesi dai pesi P, Q; il terzo è teso verticalmente dal peso R.

Nel punto O agiscono pertanto tre forze, rispettivamente eguali alle tensioni dei fili, o ai tre pesi che vi sono applicati. Spostando il punto, esso nella condizione di equilibrio riprende sempre la stessa posizione, che è l'unica in cui le tre forze si fanno equilibrio. Disposto un foglio di carta dietro al piano dei fili, potremo con tre segmenti di retta $A\,E$, $A\,B$, $A\,F$, proporzionali ai tre pesi, rappresentare la direzione e la intensità delle tre forze; indi, costruito il parallelogrammo su due qualunque di esse prese come lati, e tirata la diagonale $A\,D$, si trova che questa è direttamente opposta alla forza $A\,F$, ed eguale ad essa; e perciò una forza rappresentata dalla diagonale $A\,D$ farebbe equilibrio certamente alla eguale ed opposta $A\,F$; ma a questa

fanno realmente equilibrio le due *A E*, *A B*, dunque queste producono lo stesso effetto della unica forza rappresentata da quella diagonale, appunto come si è detto.

Fig. 22.

55. **Composizione di un numero qualunque di forze applicate a un medesimo punto.** — Quando le forze sono applicate a uno stesso punto, possono sempre ridursi ad una risultante unica. Per trovare tale risultante, basterà comporne due qualunque con la regola del parallelogrammo; poi comporre la risultante di queste due con una terza forza, e così di seguito fino a considerarle tutte.

Nella fig. 23, se OA, OB, OC, OD rappresentano forze applicate al punto O, si vede come si trova graficamente, col procedimento ora indicato, la risultante OV.

Si noti che per questa costruzione non è punto necessario che le forze siano tutte in un piano. Il risultato precedente può enunciarsi così: *quando più forze agiscono su di un punto, la risultante è rappresentata in direzione e grandezza dalla retta che congiunge questo punto all'estremità della linea poligonale, avente i lati paralleli ed uguali alle forze date.*

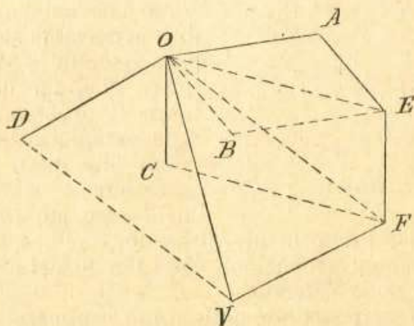


Fig. 23.

Questa proposizione è detta *poligono delle forze*, e la condizione necessaria e sufficiente per l'equilibrio è che la risultante sia eguale a *zero;* ossia, *per l'equilibrio di un sistema di forze applicate ad un punto, è necessario che la linea poligonale, i cui lati sono rispettivamente paralleli alle direzioni delle forze componenti date, ed eguali in grandezza ad esse, sia una linea chiusa.*

Se le forze date sono tre P_1, P_2, P_3 ad angolo retto tra di loro, la risultante AR è la diagonale del parallelepipedo, di cui le forze componenti sono gli spigoli (fig. 24).

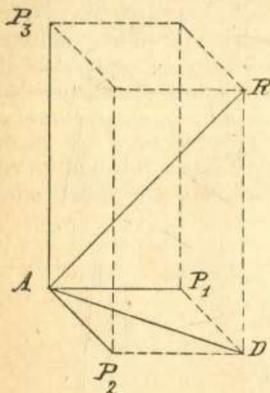


Fig. 24.

56. **Decomposizione delle forze.** — Ora ci si presenta il problema reciproco della scomposizione di una data forza in due altre; e ripetendo qui le stesse considerazioni che abbiamo fatto per la decomposizione di una velocità (§ 34), si capisce che, per determinare il problema, bisogna assegnare le condizioni alle quali devono sottostare le componenti. Il caso più frequente è che sieno date le due direzioni, e allora si ripete la medesima costruzione della fig. 10 nel problema analogo delle velocità.

57. **Composizione delle forze applicate a punti invariabilmente connessi.** — Meno semplice è il problema di trovare la risultante di forze applicate a punti invariabilmente congiunti fra loro, come possono, per es., considerarsi le particelle di un sistema rigido (§ 42). Si ricorre in tal caso al principio che si può trasportare il punto di applicazione di una forza in qualunque altro punto della sua linea d'azione, purchè rigidamente unito al primo, senza alterare l'effetto della forza.

Per meglio chiarire questa cosa, supponiamo di applicare nei punti A e B di un corpo rigido (fig. 26)

due forze eguali e in direzioni contrarie: evidentemente esse si faranno equilibrio; ma l'equilibrio non sarà turbato, se una di esse, per esempio la F applicata in A, si trasporterà in un altro punto preso sulla stessa direzione, e invariabilmente connesso con il primo.

Ciò premesso, se le linee d'azione delle forze date, agenti in punti diversi invariabilmente uniti, si incontrano, basterà trasportare le forze dai loro punti di applicazione A e B (fig. 26) nel punto di incontro C; poi se ne farà la composizione come di forze applicate ad un punto solo, e la risultante si potrà supporre applicata ad un punto qualunque della diagonale del parallelogrammo o del prolungamento.

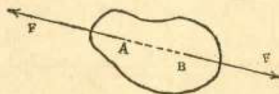


Fig. 25.

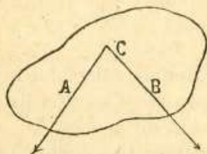


Fig. 26.

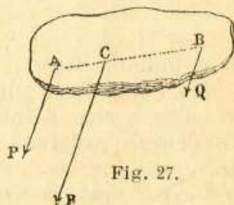


Fig. 27.

58. **Forze parallele**. — Nel caso particolare che le forze P e Q sieno parallele e dirette nello stesso verso (fig. 27), si dimostra che la risultante R è uguale alla loro somma e parallela alle componenti, ed è applicata ad un punto C che divide la retta $A\,B$ congiungente i punti d'applicazione

delle componenti, in due parti $A C$, $B C$ inversamente proporzionali alle intensità di queste.

Ci contenteremo di verificare questo teorema con un esperimento.

L'asticella $A B$ (fig. 28) è sorretta da due fili che passano su due piccole puleggie e portano due pesetti che fanno equilibrio al peso dell'asticella; cosicchè questa è libera di muoversi, come se non fosse pesante. Se ora si aggiungono due pesi P e Q alle estremità libere dei fili, bisognerà per mantener l'equilibrio applicare un peso $R = P + Q$ in un punto C, tale che sia $P \times A C = Q \times B C$.

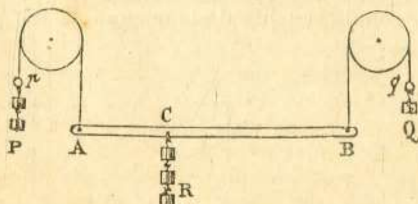


Fig. 28.

La R dunque è eguale e contraria alla risultante delle tensioni dei fili applicati in A e in B, dirette verso l'alto, e rispettivamente eguali a P e Q.

59. **Forze parallele e dirette in verso contrario.** — Se invece di due forze parallele dirette nello stesso verso, si tratta di due forze parallele dirette in verso contrario e disuguali, applicate, s'intende, a punti invariabilmente uniti, si dimostra che la risultante è eguale alla loro differenza, parallela alle forze date e diretta nel verso della maggiore: il punto di applicazione però, pur dividendo la congiungente i punti di applicazione delle componenti in parti inversamente proporzionali alle

componenti, si trova sulla detta congiungente fuori di questi punti, dalla parte della forza maggiore.

60. **Coppia; asse-momento.** — Un caso molto interessante è quello che le due forze parallele siano eguali e contrarie: un sistema simile di forze è detto *coppia.* Esso non può ridursi ad una risultante unica; non produce moto di traslazione, ma tende a far ruotare il corpo sul quale agisce. Una retta normale al piano della coppia, al piano cioè delle due forze componenti, si chiama *asse* della coppia; questa tende a produrre la rotazione intorno a tale asse, e l'efficacia sua per la rotazione è misurata dal *momento* della coppia, che è il prodotto della forza per la distanza *(braccio)* fra le due forze parallele. Le rotazioni poi sono positive o negative, a seconda che avvengono in un senso o nel senso opposto.

Si conviene di rappresentare le coppie, come le forze, con un segmento preso sull'asse, avente una lunghezza proporzionale al momento, e condotto da quella parte del suo piano, donde un osservatore vedrebbe avvenire la rotazione nel verso delle lancette di un orologio (§ 40). Un segmento siffatto è detto *asse-momento* o *giratore.*

Tale rappresentazione grafica di una coppia offre un gran vantaggio; perchè nel caso che più coppíe agiscano su di un corpo, condurremo da un punto qualunque tante rette parallele agli assi delle singole coppie, prenderemo su ciascuno segmenti che siano gli assi-momenti delle copie date, e comporremo fra loro questi assi-momenti con la stessa regola della composizione delle rotazioni (§ 40). L'asse-momento risultante, con la sua direzione indicherà l'asse intorno al quale effettivamente accadrà la rotazione, e con la sua lunghezza misurerà il momento risultante.

61. **Centro delle forze parallele.** — Quando si hanno più forze parallele applicate a punti invariabilmente uniti, se ne troverà la risultante dividendole in due gruppi, quelle dirette in un verso, e quelle dirette in verso contrario; si troverà la risultante di ciascun gruppo, applicando successivamente la regola del § 58, e così il sistema sarà ridotto a due forze parallele e contrarie, che indicheremo con R' e R''. Se sono disuguali, c'è la risultante, e si trova con il teorema del § 59; se sono eguali, il sistema si ridurrà ad una coppia. Nel caso poi che fossero eguali, contrarie e sulla stessa linea d'azione, si farebbero equilibrio.

Ora nel determinare il punto di applicazione della risultante di due o più forze parallele, ciò che importa considerare sono i punti di applicazione e l'intensità delle forze, ma nulla importa la direzione di queste; cosicchè, se le forze ruotassero tutte di un medesimo angolo mantenendosi sempre parallele, il punto di applicazione della risultante non muterebbe. Questo punto, pel quale costantemente passa la risultante quando le componenti parallele girano insieme, è detto *centro delle forze parallele*.

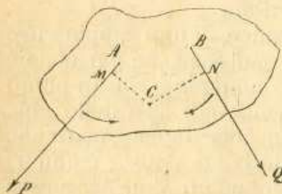


Fig. 29.

62. **Corpi girevoli intorno ad un punto o ad un asse.** — Quando un corpo non è libero, ma ha un punto fisso intorno al quale può girare in tutti i sensi, una forza che agisca sul corpo non può produrre evidentemente altro effetto che quello di farlo ruotare intorno al punto fisso. Sia nell'annessa fig. 29, C il punto fisso, $A\,P$ una

forza agente; la perpendicolare CM calata dal punto C sulla direzione della forza è detta *braccio della forza;* il prodotto $AP \times CM$ della forza pel braccio si chiama *momento di rotazione* della forza. Questo momento è zero se il braccio è nullo, ossia se la direzione della forza passa pel punto fisso; è evidente che in tal condizione una forza non potrebbe produrre alcuna rotazione. Parimenti il momento della forza BQ, *supposta nello stesso piano,* sarebbe $BQ \times CN$; e se si prende come positivo il momento della forza BQ che tende a produrre la rotazione nel verso delle lancette di un orologio, il momento dell'altra forza AP che tende a produrre la rotazione in verso contrario, deve esser preso come negativo. Ora è chiaro che *per l'equilibrio* una rotazione deve eliminare l'altra, ossia *i momenti delle due forze, rispetto al punto fisso, devono essere eguali e contrari.*

Nel caso che le forze componenti siano in un piano, si dimostra che *il momento della loro risultante è eguale colla somma algebrica rispetto al punto fisso dei momenti delle forze componenti* (teorema di Varignon).

Se invece le forze non sono in un piano, si può rappresentare il momento di ciascuna di esse, rispetto al punto fisso, con un segmento preso sull'asse condotto pel detto punto e normale al piano passante pel punto, e per la forza. Si avranno così altrettanti vettori uscenti da uno stesso punto; il vettore risultante rappresenterà con la direzione l'asse della rotazione risultante, e col suo valore la grandezza della rotazione.

Quando poi, invece di un punto, v'ha un asse fisso di rotazione, e la forza è comunque diretta, bisogna risolvere questa forza in due componenti, una normale all'asse della rotazione, l'altra paral-

lela. Soltanto la prima componente sarà efficace per la rotazione, poichè evidentemente una forza parallela all'asse non può produrre moto di rotazione. Si considererà pertanto solo la componente normale all'asse; anche in tal caso il *braccio della forza* è la distanza compresa fra l'asse e la direzione della forza, e il momento della rotazione è dato dal prodotto della forza pel braccio.

Nel caso della fig. 29, sia proiettato in C l'asse della rotazione perpendicolare al piano del foglio; $A\ P$ rappresenti la proiezione di una forza in questo piano, $C\ M$ il suo braccio: sarà $P \times C\ M$ il momento. Similmente il momento di rotazione della componente Q sarà $Q \times C\ N$. I due momenti sono di segno contrario, e per l'equilibrio dovranno essere eguali.

63. **Centro di gravità.** — Un corpo, come si è detto più volte, è un aggregato di molecole; e poiche ciascuna è pesante, viene sollecitata dalla gravità a cadere lungo la verticale che passa per essa. Si ha quindi un sistema di forze parallele, perchè è per lo più trascurabile l'angolo delle verticali a causa delle esigue dimensioni del corpo, e della immensa distanza a cui è situato il centro della terra. Bisognerebbe che due punti della superficie terrestre fossero distanti circa 111 mila metri, perchè le verticali ivi condotte s'incontrassero nel centro della terra coll'angolo di un grado.

Il peso del corpo è evidentemente la somma dei pesi delle sue particelle, e il suo punto di applicazione coincide col centro delle forze parallele di cui è la risultante: tale centro è detto *centro di gravità* o *baricentro*.

Da quanto si è osservato intorno al centro delle forze parallele, risulta che ogni corpo possiede un centro di gravità, che è sempre lo stesso se il corpo non muta forma.

Vediamo ora come si possa trovare con l'esperienza il centro di gravità di un corpo qualunque. Prendiamo, per esempio, questa irregolare lastra di ferro, e sospendiamola con un filo per un punto del suo contorno (fig. 30). Vediamo ch'essa pende da questo con una particolare direzione, sicchè possiamo tracciare sulla lastra una linea coincidente colla direzione del filo. Sospendiamo poi li-

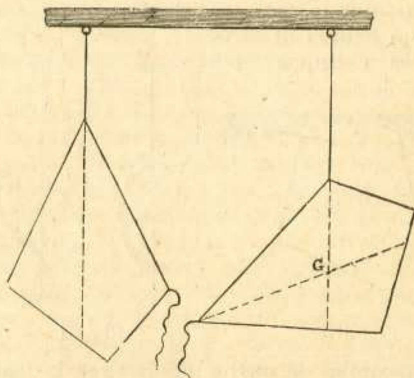


Fig. 30.

beramente la lastra per un altro punto, e tracciamo una nuova linea sul prolungamento del filo: queste due linee si taglieranno tra loro in un punto *G*. Infine, sospendiamo la lastra per un terzo punto del suo contorno, e segnando, come dianzi, una linea secondo il prolungamento del filo, troviamo che ancor questa taglia le altre due nello stesso punto *G*. E però, sospendendo la lastra per un qualsiasi punto liberamente scelto, e tracciando

sempre una linea diretta secondo il filo, tutte codeste rette si segheranno nel medesimo punto *G*.

Ora se attacchiamo una funicella a questo punto *G*, e sosteniamo con essa la lastra, vedremo che essa si terrà in bilico intorno a *G* in tutte le direzioni; appunto come se tutto il peso della lastra fosse condensato nel punto *G*. Questo punto è dunque il *centro di gravità* della lastra. E se sosteniamo la lastra liberamente con una funicella per un altro punto qualunque, essa si ridurrà in tal posizione che il suo centro di gravità *G* riesca sempre il più

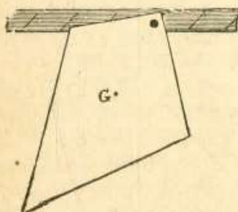


Fig. 31.

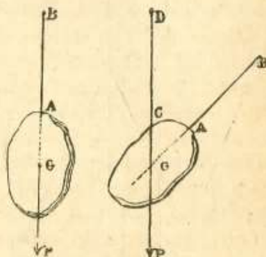


Fig. 32

basso possibile. Se anche si sorregge la lastra con una sottil caviglia, così che sia libera di ruotare intorno a questa, come nella figura 31, la lastra si ridurrà sempre col punto *G* più basso possibile, e non potrà stare stabilmente in equilibrio se non quando il punto *G* sia verticalmente sotto alla caviglia.

Come in questo caso particolare della lastra, così in generale accade, che se un corpo sospeso ad un filo per un punto *A* (fig. 32) rimane in quiete, è segno che il prolungamento del filo passa per il suo centro di gravità *G*; che se sospendiamo lo stesso corpo per un altro punto *C*, il centro di

gravità si troverà sempre sul prolungamento del filo medesimo. Quindi possiamo sperimentalmente determinare il centro di gravità di un corpo qualunque, determinando il punto d'incontro dei due prolungamenti; e si potrà considerare il peso di un corpo come una forza unica applicata al suo centro di gravità, agente in direzione verticale.

Nel caso poi che il corpo sia omogeneo ed abbia una forma geometrica regolare, si può determinare il centro di gravità col solo ragionamento; ma noi dobbiamo contentarci di pochi cenni.

Il circolo, i póligoni regolari omogenei hanno il centro di gravità, per ragione di simmetria, coincidente col centro geometrico; così pure, per la stessa ragione, una sfera, un poliedro regolare, un prisma, un cilindro, supposti omogenei, hanno il centro di gravità nel centro di figura. In un triangolo qualunque, esso si trova sulla retta che da un vertice va sulla metà del lato opposto (mediana), a due terzi di distanza dal vertice stesso; in una piramide, e quindi in un cono, esso si trova sulla retta che va dal vertice al centro di gravità della base, e precisamente a tre quarti di questa retta contati dal vertice.

61. **Condizione per l' equilibrio dei corpi pesanti. Varie specie d'equilibrio.** — Abbiamo visto che il peso di un corpo può considerarsi come una forza verticale applicata nel suo centro di gravità. Ora se il corpo è sospeso a un punto, o è sostenuto da un asse, per l'equilibrio è necessario che il momento del peso rispetto al punto o all'asse sia nullo; e poichè il peso non può esser zero, è necessario che sia nullo il braccio; ossia la verticale condotta pel centro di gravità deve passare pel punto o per l'asse di sospensione (§ 63).

Ma questa condizione può verificarsi in tre distinti casi: o il centro di gravità coincide con il punto di sospensione, o è più basso (fig. 33), o è più alto (fig. 34). Nel primo caso, come si è visto dianzi, il corpo resterà *in equilibrio indifferente*, comunque lo si volti; nel secondo se si sposta *di poco* dalla posizione di equilibrio, esso vi ritorna, e l'equilibrio è *stabile;* nel terzo, ad ogni piccolo spostamento, il corpo si allontana dalla posizione d'equilibrio, il quale è pertanto *instabile.*

Un cono posato sopra un piano con la base è in equilibrio stabile; se vi è adagiato con una ge-



Fig. 33.



Fig. 34.

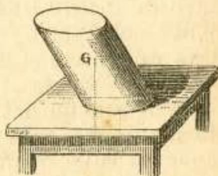


Fig. 35.

neratrice, è in equilibrio indifferente; finalmente, se è in equilibrio quando vi posa con il vertice, l'equilibrio è instabile.

Un grave che si trovi sopra un piano orizzontale è in equilibrio, quando la verticale condotta dal suo centro di gravità cade entro la base. La torre pendente di Pisa è in equilibrio, come il cilindro della fig. 35.

Anche in questo caso di un solido che riposa sopra un piano, l'equilibrio sarà tanto più stabile, quanto più basso si troverà il centro di gravità.

65. **Macchine.** — Le *macchine* si compongono di corpi rigidi aventi dei punti, degli assi, de' piani

fissi, che con una equivalente reazione equilibrano la risultante delle forze agenti: per mezzo loro si può fare equilibrio ad una forza con un'altra che non è eguale nè direttamente contraria. Per lo più in una macchina si considerano due sole forze: quella che si vuole *equilibrare* o *vincere* detta *resistenza*, e l'altra che s'impiega a tal fine detta *potenza* o *forza motrice*.

Abbiamo detto equilibrare o vincere la resistenza, giacchè in realtà le macchine, anzichè a fare equilibrio, sono quasi sempre usate a vincere resistenze, come a sollevare pesi, a mettere corpi in moto, ecc., in altre parole a *fare un lavoro*.

Tuttavia noi investigheremo prima le condizioni che devono verificarsi fra la potenza, la resistenza e' certi elementi della macchina, affinchè questa sia in equilibrio; tale studio ci faciliterà di poi quello delle macchine in movimento.

Ove non si avverta esplicitamente il contrario, intenderemo le parti di una macchina senza peso e senza attrito; ma le condizioni di equilibrio che otterremo a questo modo puramente teorico, nella pratica dovranno essere opportunamente modificate, giacchè allora bisogna tener conto anche del peso degli organi della macchina, della quantità di forza perduta come effetto utile nel superare gli ostacoli passivi che si oppongono al movimento; nè si può fare astrazione dalle deformazioni alle quali vanno soggetti gli organi materiali.

Fra le moltissime macchine, sono dette *semplici* quelle che non si possono decomporre in parti, e ciascuna da sè sola può servire da macchina; *composte* tutte le altre che risultano di più macchine semplici convenientemente messe insieme.

Le macchine semplici, a seconda che presentano un punto, od un asse, o un piano fissi, si distinguono in tre gruppi:

1° Leva

2° { Verricello, o asse nella ruota
Puleggia

3° { Piano inclinato
Vite
Cuneo.

66. **Leva.** — La *leva* consiste in un corpo rigido, girevole intorno ad un punto fisso detto *fulcro*, e sollecitato a ruotare in versi contrari dalla po-

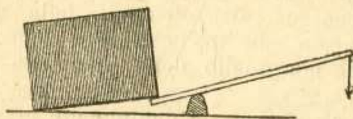


Fig. 36.

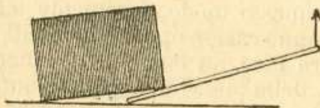


Fig. 37.

tenza e dalla resistenza. Il corpo della leva ha per lo più la forma di una spranga: se questa è rettilinea, la leva è *diritta* (fig. 36 e 37), altrimenti dicesi *falcata* (fig. 38).

Da quanto si è detto al § 62 risulta che *per l'equilibrio, i momenti della potenza e della resistenza rispetto al fulcro devono essere eguali e di segno*

contrario: perciò le forze devono essere in un piano, e le loro intensità devono essere in ragione inversa de' rispettivi bracci. Quando con una piccola forza (potenza) si può equilibrare una resistenza maggiore, si dice che la leva offre un *vantaggio.* E non nella leva soltanto, ma in ogni macchina il vantaggio suole misurarsi dal rapporto fra la resistenza e la potenza che le fa equilibrio. Ma se la leva dall'equilibrio passa al moto, i punti di applicazione della potenza e della resistenza percorreranno in generale spazi diversi, che dipenderanno

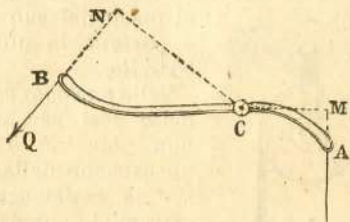


Fig. 38.

dalla intensità delle forze. Difatti, se supporremo che ciascuna forza si mantenga d'intensità costante, e che le loro direzioni siano in ogni istante tangenti alle circonferenze descritte dai punti di applicazione, è facile vedere, indicando con s e s' rispettivamente gli spazi percorsi dai punti di applicazione della potenza e della resistenza, che sussiste la relazione:

$$P : Q = s' : s$$

perchè s e s' stanno come i rispettivi bracci di leva.

In generale, se si passa dall'equilibrio al moto, gli spazi contemporaneamente percorsi dai punti di

applicazione della potenza e della resistenza sono, in ogni macchina, in ragione inversa delle intensità che devono avere le forze per l'equilibrio: si accenna a questo principio quando si dice, che *quanto si guadagna in forza, altrettanto si perde in velocità.* Torneremo sull'argomento con maggiori particolari nella dinamica, quando si parlerà del lavoro delle macchine.

67. **Puleggia.** — La *puleggia* o *carrucola* consiste in un disco avente una scanalatura detta *gola*, entro la quale scorre una fune; essa può girare intorno ad un asse normale al disco nel suo centro, ed è portata da una *staffa* o *bozzello.*

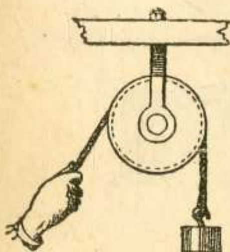


Fig. 39.

Nella *puleggia fissa* (fig. 39), detta così perchè il disco non sale nè scende, ad un estremo della fune agisce la resistenza, all'altro estremo la potenza. La fune rimanendo sempre tangente al disco, abbraccia superiormente un arco maggiore o minore, a seconda della direzione delle forze. I bracci di queste sono i raggi della puleggia; onde, per l'equilibrio, la potenza deve essere eguale alla resistenza.

La puleggia non serve che a dare alla forza la direzione più comoda. Se però per l'equilibrio è indifferente nella puleggia fissa la direzione delle forze, lo stesso non succede per la loro risultante, e quindi per la pressione che sopporta l'asse della puleggia.

Nella *puleggia mobile* (fig. 40) il peso è attaccato alla staffa volta in giù; la fune, fissa a un

capo, abbraccia la parte inferiore del disco ed è tesa dalla potenza che tira verso l'alto. Quando i tratti di fune sono paralleli, la potenza deve per l'equilibrio essere la metà della resistenza, poichè la tensione del peso si riparte egualmente ne' due tratti di fune.

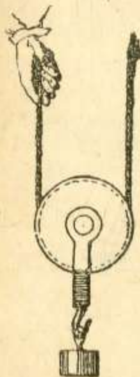


Fig. 40.

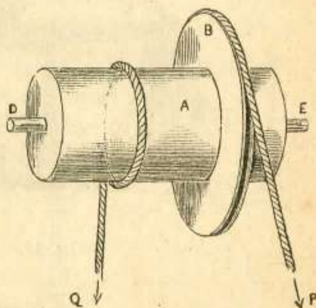


Fig. 41.

68. **Asse nella ruota.** — Questa macchina detta anche *verricello*, *tornio*, è fatta di due cilindri rigidi, solidamente uniti, girevoli intorno ad un asse comune: il cilindro maggiore si chiama *ruota*, il più piccolo *asse* (fig. 41).

La macchina è sollecitata a ruotare in opposti versi da due forze, la potenza e la resistenza, le quali agiscono all'estremità di due funi avvolte in contrario senso, l'una sulla ruota e l'altra sull'asse. Evidentemente si tratta di una specie di leva, nella quale i raggi della ruota e del cilindro sono rispettivamente i bracci della potenza e della resistenza; onde la condizione di equilibrio è, che la potenza

stia alla resistenza, come il raggio del piccolo cilindro (asse) sta a quello della ruota.

La *burbera* (fig. 42) e l'*argano* (fig. 43) non sono che modificazioni dell' asse nella ruota: la ruota è

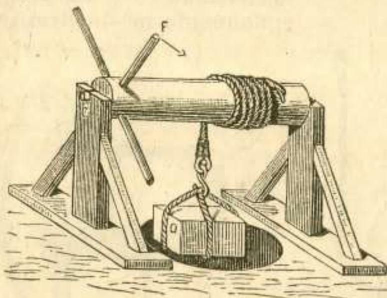


Fig. 42.

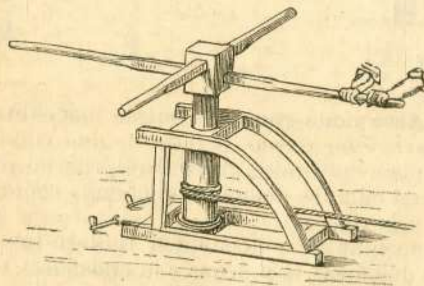


Fig. 43.

sostituita dai raggi che servono da manovelle. La condizione di equilibrio di tali macchine è pertanto quella detta dianzi.

69. **Bilancia.** — Un' applicazione importante della leva è la *bilancia*. La bilancia (fig. 44) consta del *giogo* e dei *piatti*. Il giogo ha per lo più la forma di losanga oblunga, ed è intagliato affinchè riesca leggiero; esso deve essere perfettamente simmetrico rispetto al suo punto di mezzo, ove è incastrato un prisma triangolare d'acciaio temprato, detto

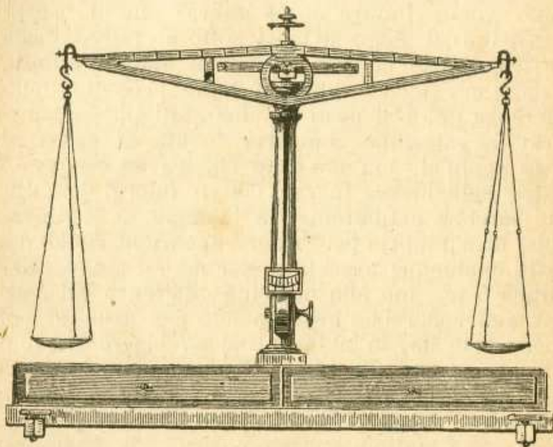


Fig. 44.

coltello, con lo spigolo tagliente in basso e normale alla lunghezza del giogo: tale spigolo, appoggiandosi su un piano orizzontale di acciaio o di pietra dura, è il fulcro della bilancia, e realizza quasi la condizione di un asse geometrico. Alle estremità del giogo sono attaccati, per mezzo di ganci, due piattelli o coppe eguali portati da fili, come si vede nella figura. La retta che unisce i punti di sospen-

sione de' piattelli deve passare per il fulcro; il giogo poi non deve inflettersi sotto il carico, perchè in questo caso verrebbe a diminuire la sensibilità dell'istrumento, come si vedrà più innanzi.

Affinchè la bilancia sia *giusta*, è necessario che i due bracci di leva siano esattamente eguali sotto ogni riguardo: se tale condizione è soddisfatta, i momenti di due pesi eguali posti sui piattelli saranno eguali. Inoltre è necessario che il centro di gravità del giogo si trovi sotto al fulcro, ossia che l'equilibrio della bilancia sia stabile: difatti, quando ciò accade, alla rotazione prodotta dalla differenza de' pesi posti ne' due piattelli, fa equilibrio la rotazione contraria dovuta al peso del giogo applicato nel suo centro di gravità. Se questo centro coincidesse invece con il fulcro, l'equilibrio sarebbe indifferente; la bilancia cioè rimarrebbe in equilibrio per l'azione di carichi eguali nei piatti, qualunque fosse la posizione del giogo, orizzontale o no; ma alla menoma differenza dei detti pesi traboccherebbe bruscamente per disporsi col giogo verticale; la bilancia così sarebbe *folle*, e non potrebbe servire alle pesate. Evidentemente la stessa cosa accadrebbe se il centro di gravità del giogo si trovasse sopra al fulcro, nel caso cioè che l'equilibrio con i piattelli scarichi o carichi di eguali pesi fosse instabile.

Quando saranno realizzate le dette condizioni, la bilancia rimarrà col giogo orizzontale, dopo avere liberamente oscillato, coi piattelli scarichi o carichi di eguali pesi. Per giudicare poi della orizzontalità del giogo, vi si unisce un lungo indice rivolto in basso, colla punta di fronte a una graduazione. Quando si fa una pesata, si mettono i pesi graduati su di un piattello, e la cosa da pesare sull'altro: non è necessario aspettare che il giogo si

fermi, ma basterà osservare se le oscillazioni dell'indice riescano simmetriche da una parte e dall'altra dello zero della graduazione; va da sè che a regolare l'istrumento, è necessario che la colonna riposi su una base fornita di piedi a vite.

Ma non basta che la bilancia sia giusta; si richiede inoltre ch'essa sia *sensibile*, che s'inclini cioè alla menoma differenza dei pesi posti nei due piatti; o, in altre parole, si vuole che per una data differenza di tali pesi, lo spostamento dell'indice sia grande il più possibile. A tal fine è necessario che i bracci di leva siano lunghi, in modo però da non flettersi; che il giogo sia leggiero; e che il suo centro di gravità, pur rimanendo sotto al fulcro, gli sia però molto prossimo. A regolare, secondo i casi, la sensibilità di una data bilancia, si sposta il centro di gravità del giogo coll'alzare o abbassare il dado a vite che si vede in cima alla figura.

È difficile nella pratica di realizzare con rigore tutte queste condizioni; e però, quando bisogna la massima precisione, si ricorre al metodo *della doppia pesata;* con esso si può avere il peso esatto di un corpo, anche quando la bilancia non è giusta. Per eseguire una doppia pesata, si mette il corpo che si vuol pesare in un piatto, e gli si fa equilibrio ponendo sull'altro dei finissimi pallini di piombo. Si toglie indi il corpo dal piatto e, in sua vece, si mettono dei pesi graduati in modo da riprodurre l'equilibrio; è allora evidente che questi pesi misurano il giusto peso del corpo, qualunque siano i bracci di leva della bilancia.

Si potrebbe anche fare una prima pesata, e poi una seconda, scambiando il corpo e i pesi graduati nei piatti: la media geometrica delle due pesate sarebbe il vero peso del corpo.

Per l'importanza grandissima che ha questo soggetto, sarà bene di aggiungere qualche particolare sul modo da tenersi per fare una doppia pesata. Si comincia con il collocare la bilancia su di un piano orizzontale ben resistente, non soggetto a scuotimenti; si abbassa dolcemente il giogo mediante il movimento della forchetta, e girando in un senso o nell'altro le viti calanti del piede, si conduce l'ago allo zero della divisione.

Regolata in tal guisa la bilancia, se si vuol fare una doppia pesata, si pone in un piatto il corpo da pesare e nell'altro dei pallini di piombo fino a fargli prossimamente equilibrio. Poi si estingue l'oscillazione dei piattelli, si chiude la cassa che chiude la bilancia, e abbassando la forchetta si libera il giogo: si osservano allora le oscillazioni dell'ago; se esse sono simmetriche rispetto allo zero, l'equilibrio è esatto; se no, si aggiungono o tolgono delicatamente dei pallini. Ottenute le oscillazioni simmetriche dell'ago, si toglie il corpo e gli si sostituiscono dei pesi conosciuti, come si è detto sopra, fino a realizzare le condizioni di cose precedenti: il peso vero del corpo è dato dai pesi sostituiti.

70. **Stadera.** — Diciamo due parole anche della *stadera* (fig. 45): in essa, mentre resta costante il braccio della forza P, si fa variare, per ottenere l'equilibrio, il braccio dell'altra forza costante Q, detta *romano*. Lo zero della graduazione corrisponde a quel punto nel quale deve trovarsi il romano, affinchè la stadera scarica sia orizzontale; si segna 1 dove il romano fa equilibrio al peso di 1 kg. applicato in A; si divide l'intervallo, per esempio, in 10 parti, e si prolungano le divisioni sino all'estremo B. Se si vogliono pesare corpi di massa maggiore, senza esagerare la lunghezza della sta-

dera, bisogna servirsi di un'altro fulcro più prossimo al punto di applicazione del peso *P*, e si guarda all'altra graduazione incisa sul lato inferiore dell'asta.

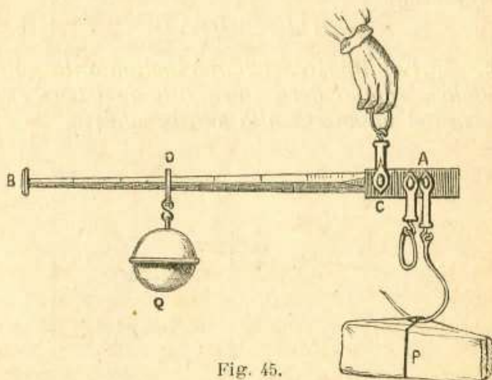


Fig. 45.

71. **Piano inclinato.** — Vediamo ora la condizione di equilibrio nel *piano inclinato.* Questo è un piano levigato, resistente, inclinato sulla direzione della forza; se si considera il peso dei corpi, è un piano inclinato sull'orizzonte. Un corpo che vi è poggiato sopra, non può rimanere in equilibrio se non vi è sostenuto da una forza, la potenza. Nella figura 46, *A C* rappresenta la lunghezza del piano inclinato; *A B* perpendicolare al piano orizzontale passante per *B* è la sua *altezza*, e *B C* la *base.* Il peso del corpo *O Q*, applicato nel centro di gravità *O* di questo, si può imaginare risoluto nelle due componenti, *O N* normale e *O E* parallela al piano. La prima dà la misura della pressione che il corpo esercita sul piano, ma non produce moto; è la se-

conda che sollecita il corpo a cadere, e quindi bisogna applicare a questo, per mantenerlo in equilibrio, una forza OP eguale e contraria a OE. Dalla similitudine dei due triangoli ACB, OEQ si deduce che:

$$P : Q = AB : AC$$

ossia, *per l'equilibrio nel piano inclinato, la potenza parallela al piano deve stare alla resistenza, come l'altezza del piano sta alla sua lunghezza.*

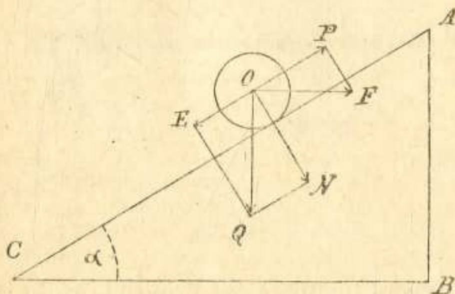


Fig. 46.

Supponiamo ora che la forza agisca parallelamente alla base CB del piano inclinato: per mantenere in equilibrio su questo il corpo di peso Q, essa deve avere un valore OF tale che la sua componente OP parallela al piano sia eguale e contraria alla OE, ossia alla componente del peso Q la quale sollecita la caduta. Dai triangoli simili POF e ABC si ha, indicando con b la base:

$$F : P = l : b,$$

e avendosi che:

$$P : Q = a : l,$$

si ha, moltiplicando termine a termine, che

$$F : Q = a : b$$

ossia, *per l'equilibrio in un piano inclinato, quando la potenza agisce parallelamente alla base, la condizione necessaria e sufficiente è che la potenza stia alla resistenza come l'altezza sta alla base.*

Si vede anche chiaramente che su di un piano inclinato c'è sempre vantaggio quando la forza agisce parallelamente alla lunghezza; quando invece essa agisce parallelamente alla base, può esservi o no vantaggio, a seconda della inclinazione del piano.

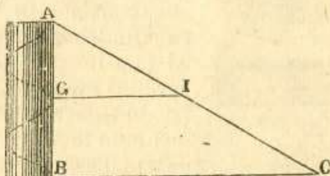


Fig. 47.

72. **Vite; vite micrometrica.** — La *vite* è una macchina che ha molta attinenza col piano inclinato. Per vedere com'è costruita, si immagini un triangolo rettangolo (fig. 47) che ruoti attorno ad un cilindro, in maniera che il cateto $A\,B$ giaccia secondo una generatrice della superficie cilindrica. L'ipotenusa $A\,C$ descriverà allora un'*elica*, nella quale il segmento $A\,G$ determinato sopra una generatrice da due incontri della curva, è il *passo dell'elica.* Imaginiamo ora verticale il cilindro di raggio r, e supponiamo che un punto di peso q sia appoggiato sull'elica: evidentemente, senza l'aiuto di una forza f, esso vi scenderebbe come per un

piano inclinato che ha per altezza il passo $AG = a$ dell' elica, e per base la circonferenza $2\pi r$ del cilindro. Se la f agisce parallelamente alla base e tangente al cilindro, per l'equilibrio sarà:

$$f : q = a : 2\pi r.$$

Ciò posto, facciamo correre sulla superficie del cilindro, e secondo l'elica, un risalto triangolare o rettangolare detto *filetto* o *verme*, ed avremo la *vite* o più propriamente il *pane della vite;* esso penetra in una *madrevite* (fig. 48), che consiste in un'apertura cilindrica, avente un solco tale da potersi considerare lo stampo del verme. Le due parti insieme unite formano la vite: se uno dei pezzi è fisso, l'altro non potrà muoversi se non girando intorno all'asse del cilindro, e avanzando nella direzione di questo di un passo per giro.

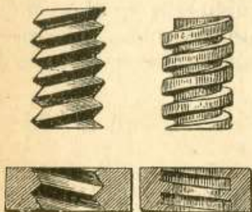


Fig. 48.

Per determinare la condizione di equilibrio in questa macchina, supponiamo fissa la madrevite e mobile il pane, sul quale agisca una pressione Q. Questa si trasmetterà a tutti i punti di contatto del verme colla madrevite; e per impedire il moto del pane, bisognerebbe applicarvi tante forze analoghe alla f dianzi considerata. Ad esse sostituendo la loro risultante P, si ha per l'equilibrio:

$$P : Q = a : 2\pi r$$

cioè, *la condizione necessaria e sufficiente per l' equilibrio nella vite è che la potenza stia alla resi-*

stenza, come il passo sta alla circonferenza del cilindro. E s'intende assai facilmente che se la potenza agisce all'estremità di un braccio orizzontale *(manovella)* fissato al cilindro, il rapporto delle due forze, per l'equilibrio, deve essere quello del passo alla circonferenza descritta con un raggio di lunghezza eguale alla manovella.

Risulta dalle cose dette che una vite è tanto più efficace, quanto il passo è più stretto e il braccio della potenza più lungo.

La vite può servire a misurare con grande esattezza lo spessore dei corpi; allora prende il nome di *vite micrometrica.* Consiste essa essenzialmente in una vite a piccolo passo, per lo più di un millimetro, la quale porta alla sua testa un disco concentrico e perpendicolare al di lei asse (fig. 49), col lembo diviso in un certo numero di parti eguali. La figura mostra la madrevite portata da un tripode acuminato, le punte del quale sono i vertici di un triangolo regolare, e riposano su un piano di vetro diligentemente lavorato. Supponiamo che abbassando la vite finchè la punta di essa tocchi il piano, lo zero del lembo si trovi di rimpetto allo zero del coltello verticale, che si vede a destra. Allora, per misurare lo spessore di un oggetto, di una lastrina di vetro per esempio, si rialza la vite,

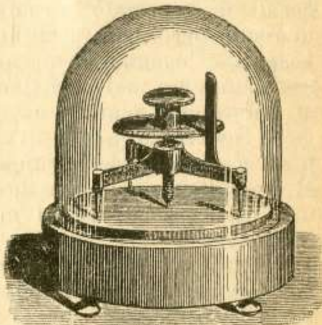


Fig. 49.

e si pone fra la sua punta e il piano di vetro la lamina da misurare; di poi, abbassando la vite finchè questa tocchi la lamina, si leggerà direttamente sul coltello diviso in millimetri lo spessore della lamina; e se v'ha alcuna frazione, come quasi sempre succede, la si desume dalla divisione del lembo che si trova davanti al coltello.

Nelle *viti a scrupolo* o *di livello* applicate agli strumenti di misura, la vite per lo più non può avanzare, ma è la madrevite che si alza o si abbassa gradatamente.

73. **Attrito e altre resistenze passive.** — I sistemi meccanici presi in esame, li abbiamo considerati in uno stato puramente geometrico, ideale; in realtà però sono costituiti da organi materiali pesanti, e bisogna tener conto del loro peso. Inoltre essi non sono mai perfettamente rigidi e lisci, ma si deformano sempre un poco, e presentano una certa scabrezza; onde avviene che quando sono posti a contatto, le prominenze di una superficie si impigliano nelle cavità dell'altra, e ne nasce una certa resistenza al moto detta *resistenza di attrito.*

Di più le funi non sono mai perfettamente flessibili, come abbiamo ammesso, ma presentano una certa rigidità, così che si richiede uno sforzo a piegarle, e anche di questa circostanza bisogna tener conto.

Quanto all'*attrito,* se ne distinguono principalmente due specie: l'*attrito radente* che si verifica quando una superficie striscia sull'altra, e l'*attrito volvente* quando una superficie rotola e si rivolge sopra un'altra, come per es. un cilindro o una sfera su di un piano.

L'*attrito dei perni* è un caso speciale di attrito radente.

L'esperienza prova che l'attrito volvente è sempre minore di quello radente: questo poi è proporzionale, con buona approssimazione, alla pressione esercitata dal corpo, ed è indipendente dalla superficie di contatto: così, per es., un parallelepipedo soggetto al solo suo peso, incontra la medesima resistenza nello scorrere su un piano orizzontale, qualunque sia la faccia con la quale vi si appoggia.

L'attrito radente ha inoltre un valore un po' maggiore al principio del moto, che durante questo. In generale, dette P la forza premente e F quella di attrito, il rapporto $\frac{F}{P}$, che si chiama *coefficiente di attrito*, rimane costante finchè non mutano le condizioni fisiche delle superficie poste a contatto: esso è poi minore fra corpi eterogenei che fra corpi omogenei, minore pe' metalli che pe' legni; diminuisce, spalmando di sostanze untuose le superficie.

L'attrito volvente è anch'esso proporzionale alla forza premente, e in ragione inversa del diametro del corpo che rotola.

Tra le resistenze passive è da annoverare anche la *resistenza del mezzo* in cui un corpo si muove, perchè una parte della quantità di moto di questo si comunica alle particelle del mezzo. Nell'aria si ritiene che essa sia proporzionale all'ampiezza della superficie urtante e cresce con la velocità. Essa dipende anche dalla forma della superficie: i corpi acuminati che fendono bene l'aria, incontrano minore resistenza; correndo con un ombrello aperto dietro le spalle, s'incontra maggior resistenza che tenendolo aperto davanti. I fiocchi di neve cadono con uniforme lentezza per la resistenza che l'aria oppone al loro moto; senza tale circostanza, le goccie di pioggia riuscirebbero micidiali.

La perdita di velocità è proporzionale alla perdita di forza, la quale cresce col numero delle molecole spostate e con la velocità ad esse comunicata. Se un corpo si muove con velocità doppia di un altro, percorrendo nello stesso tempo uno spazio doppio, sposterà un doppio numero di molecole del mezzo, e comunicherà a ciascuna d'esse una velocità doppia; perciò la sua perdita sarà quattro volte maggiore di quella fatta dall'altro. Analogamente, per una velocità tripla la perdita di velocità sarebbe nove volte maggiore, e così via. In generale, *la resistenza opposta dall'aria a un corpo in movimento, si ritiene prossimamente proporzionale al quadrato della velocità che questo possiede.*

Nel caso di una sfera poi il rallentamento della caduta è tanto più grande quanto più essa è piccola, e la ragione è questa: mentre il peso è proporzionale al volume e quindi al cubo del raggio della sfera, la resistenza opposta dall'aria è proporzionale invece alla sua superficie e quindi al quadrato del raggio; perciò, al diminuire di questo, il peso diminuisce assai più rapidamente della resistenza dell'aria.

Questa è anzi la ragione per la quale i corpi ridotti in piccoli frammenti, come le polveri minute e le piccole goccie, cadono tanto lentamente da sembrare spesso come immobili.

Senza attrito, noi nel camminare sdrucciolleremmo come si fa sul ghiaccio; e appena vi fosse un piccolo pendio, precipiteremmo sino al fondo della pendenza.

74. **Libera caduta dei gravi.** — Abbiamo accennato alla caduta dei gravi, unicamente come esempio che poteva servirci a chiarire le nostre idee, quando ragionammo del moto uniformemente vario e delle sue leggi

Ora sarà bene che completiamo, per quanto è possibile farlo rimanendo in modesti confini, il nostro studio a tale proposito.

Ricordiamo che *una forza costante,* una forza cioè che agisce sempre nella medesima direzione e con la medesima intensità, comunica a un corpo libero sul quale agisce, costantemente la stessa accelerazione; e quindi produce un moto uniformemente vario, che sarà accelerato se agisce nel senso stesso del movimento, ritardato se agisce nel senso contrario.

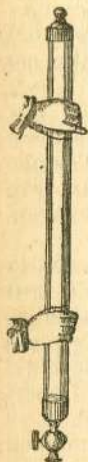
Ora un corpo il quale si muove nel vuoto, obbedendo soltanto al proprio peso, si trova nella condizione di un corpo libero soggetto all'azione di una forza costante, e perciò la sua caduta deve essere un moto uniformemente accelerato, e la sua ascesa un moto uniformemente ritardato.

Siffatte illazioni possono essere verificate con la esperienza in molti modi: il più semplice di tutti è quello primamente messo in pratica da Galileo, il quale facendo cadere delle palline lungo piani inclinati, constatava che gli spazi da esse percorsi stavano fra loro come i quadrati dei tempi impiegati a percorrerli; il che, come sappiamo, è la legge caratteristica di questo moto, quando manchi ogni velocità iniziale (§ 31).

Ma l'accelerazione che i diversi corpi acquistano cadendo, sarà la stessa per tutti nel medesimo luogo, o sarà diversa? Essa è realmente la stessa, come prima di ogni altro mise in evidenza Galileo, quantunque a un osservatore superficiale possa parere il contrario, giacchè si vede che un sasso e una piuma, per esempio, cadono con diversa velocità.

Tale differenza è dovuta non all'attrazione terrestre, bensì all'aria che agisce come una forza

resistente al moto, e però perturba il fenomeno. Tolta l'aria, tutti i corpi acquistano cadendo la medesima velocità. Questo fatto interessante si mostra col tubo della fig. 50, della lunghezza di circa un metro, nel quale sono contenuti pezzetti di piombo, di sughero, barboline di penna, pezzetti di carta. Rovesciando bruscamente il tubo, si vedono questi corpi cadere l'uno dopo l'altro, finchè esso contiene aria; ma quando questa viene estratta col mezzo della macchina pneumatica, si vede, se si ripete l'esperienza, che quei corpi cadono con la stessa velocità, quasi fossero un corpo solo.


Fig. 50.

Fatta questa verifica, possiamo al libero moto de' gravi nel senso verticale applicare le formule generali (§ 31) del moto uniformemente vario, ponendovi in luogo di *c* l'accelerazione *g* di gravità, eguale ne' nostri paesi a $9^{m},80$. Inoltre, ricordando che il peso di un corpo è eguale al prodotto della massa per l'accelerazione di gravità, potremo ritenere che *le masse de' corpi, ossia le quantità di materia che li costituiscono, stanno fra loro come i pesi che hanno nello stesso luogo.* Si è detto nello stesso luogo, perchè realmente l'accelerazione di gravità varia da luogo a luogo della superficie terrestre, e quindi un medesimo corpo non pesa da per tutto lo stesso. Ricordiamo però che tali variazioni sono molto piccole, e vengono trascurate quando non si richiede la massima esattezza: per es. all'equatore la gravità ha il valore minimo di $9^{m},781$, e al polo ha il valore massimo di $9^{m},815$: alle nostre latitudini possiamo, senza

errore sensibile, ritener la gravità costante ed eguale a $9^m,80$.

L'accelerazione di gravità, meglio che studiando la libera caduta dei gravi, può essere determinata in un luogo qualunque della terra, misurando la durata dell'oscillazione di un pendolo: così è che ora vogliamo trattare di quest'altro importantissimo apparecchio.

75. **Moto lungo un piano inclinato.** — Ma prima è bene premettere un cenno sulla caduta dei gravi lungo un piano inclinato.

Il moto di un corpo che scende per un piano inclinato senza attrito, è uniformemente accelerato: in questo moto l'accelerazione dipende dalla inclinazione del piano, poichè essa è la componente della gravità nel senso della lunghezza. E però risolvendo l'accelerazione di gravità nelle due componenti, una normale al piano, e l'altra parallela a questo, come si fece con la forza (§ 71), e dicendo a e l rispettivamente l'altezza e la lunghezza del piano, si trova che l'accelerazione g' lungo il piano è data dalla relazione:

$$g' = g \cdot \frac{a}{l}. \tag{1}$$

Introducendo questo valore dell'accelerazione nelle formule generali del moto uniformemente vario, si hanno le equazioni che regolano il moto de' gravi lungo un piano inclinato.

Noteremo questo particolare: la velocità che acquista un grave che cade lungo l'altezza è eguale a $\sqrt{2ga}$; quella che acquista lungo il piano è eguale a $\sqrt{2g'l}$: queste due espressioni, per la (1), sono eguali. E poichè ciò vale per un piano qualunque, si vede che un corpo il quale cada da un livello ad altro, acquista la medesima velocità tanto cadendo lungo

la verticale, quanto scendendo per un piano inclinato, o una linea curva. I tempi impiegati nella discesa sono però evidentemente diversi.

76. **Pendolo.** — Pendolo si chiama qualunque corpo soggetto alla sola azione del suo peso, e girevole attorno ad un punto o ad un asse orizzontale superiore al centro di gravità: per esempio, il giogo di una bilancia, nelle condizioni dette innanzi, è un vero pendolo. Noi però cominceremo collo studiare il *pendolo semplice*, che si suppone formato da un punto pesante O (fig. 51), attaccato ad un filo CO inestensibile e senza peso. Come si vede, il pendolo semplice è un pendolo ideale; nella pratica ci si accosta a queste condizioni prendendo una pallina pesante attaccata ad un sottil filo di seta. Si viene con ciò a fare un filo a piombo CO; spostandolo in CM, e poi abbandonandolo liberamente a sè stesso, la pallina discende lungo l'arco MO con velocità crescente, la quale è massima nel punto più basso O; qui non può fermarsi, ma per inerzia passa avanti e sale dall'altra parte, sino alla stessa altezza di M, con velocità decrescente: poi torna indietro e ripassa in ogni punto con la stessa velocità, mutata però di segno; e così seguiterebbe indefinitamente, se non incon-

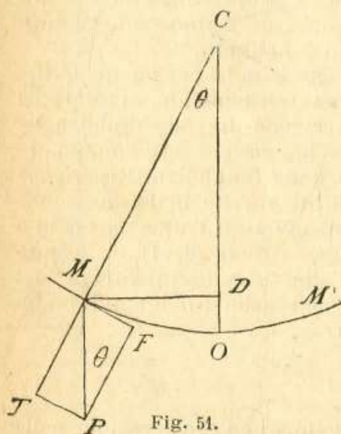


Fig. 51.

trasse resistenza al moto dall'aria e dall'attrito del filo nel punto C di sospensione. Ricordiamo che *un'oscillazione semplice* è il movimento d'andata da M in M', o di ritorno; *oscillazione completa* il movimento d'andata e di ritorno, e comprende due oscillazioni semplici; *fase* la frazione dell'oscillazione; *periodo dell'oscillazione* il tempo impiegato in una di tali oscillazioni.

Il peso P della sferetta si può, in ogni punto della sua traiettoria, imaginare decomposto nelle due componenti $M\,T$ e $M\,F$: la prima nella direzione del filo viene elisa dalla resistenza del punto fisso C; la seconda nella direzione del moto, ossia tangente alla curva, è la sola che tende a ricondurre la sferetta nella posizione di equilibrio.

Se lo spostamento della sferetta, ossia la sua distanza dal punto più basso, è piccolo, è facile vedere che la componente nel senso del movimento è sensibilmente proporzionale allo spostamento stesso.

Conduciamo a tal fine la $M\,D$ normale alla verticale $C\,O$: dai due triangoli simili $M\,F\,P$, $M\,C\,D$ si ha:

$$F : P = M\,D : C\,M.$$

E se lo spostamento è sufficientemente piccolo, tanto che senza sensibile errore si possa confondere la $M\,D$ con l'arco $M\,O$, si ha:

$$F : P = x : l$$

indicando con x l'arco variabile $M\,O$, e con l la lunghezza del filo $C\,M$. Da questa si ottiene:

$$F = \frac{P}{l} \cdot x,$$

la quale precisamente dice che, per piccole oscillazioni, il punto mobile è in ogni istante sollecitato

da una forza proporzionale allo spostamento. La forza motrice va dunque continuamente decrescendo nella discesa: è nulla nel punto più basso O, e poi va aumentando di nuovo, ma allora è contraria al moto; ne viene, come si è detto, che il moto della sferetta è accelerato nella caduta, poichè la forza agisce nel senso del moto, ed è invece ritardato nell'ascesa, ma non uniformemente.

77. **Durata delle piccole oscillazioni di un pendolo.** — Proponiamoci ora di trovare una formula generale che dia, nel caso di piccole oscillazioni, la durata di una di esse. Supponiamo, come si è detto, il pendolo ridotto ad un punto materiale M sostenuto da un filo inestensibile e senza peso.

Essendo la forza che sollecita il punto, nella detta ipotesi, proporzionale allo spostamento, sarà a questo proporzionale, per la 2ª legge della dinamica, anche l'accelerazione. Ora, ogni volta che un punto materiale, spostato dalla sua naturale posizione di equilibrio, è animato da una accelerazione proporzionale allo spostamento, oscilla innanzi e indietro alla posizione di equilibrio, e si dimostra che la durata T d'oscillazione è data dalla somma:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{x}{f}}, \tag{2}$$

nella quale x e lo spostamento dal punto e f la sua accelerazione.

Basterà quindi, per trovare il periodo nel caso del pendolo, di sostituire nella formula all'accelerazione f il suo valore; questa si trova dividendo la forza F suddetta per la massa, si ha cioè:

$$f = \frac{F}{m} = g\,\frac{x}{l};$$

effettuando la sostituzione si ha:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \tag{3}$$

78. **Leggi del moto oscillatorio pendolare.** — La formula ora trovata per la durata delle piccole oscillazioni di un pendolo, compendia in sè tutte le leggi del moto pendolare: esse possono essere verificate con l'esperienza, costruendo con un filo di seta e una sferetta pesante un pendolo che realizzi prossimamente, come si è detto, le condizioni del pendolo semplice. Riassumiamole brevemente:

1° *Le piccole oscillazioni di un pendolo sono isocrone*, si compiono cioè nello stesso tempo, indipendentemte dall'ampiezza. Questa è una legge scoperta da Galileo; si verifica contando il tempo che il pendolo semplice impiega a fare un certo numero *n* di oscillazioni; si vede che è lo stesso per le prime *n* oscillazioni che sono le più ampie, e per le seguenti che vanno a mano spegnendosi.

2° *La durata dell'oscillazione o periodo, non dipende dalla sostanza, nè dal peso della pallina:* tale fatto conferma che il valore della gravità è lo stesso per tutti i corpi. Si verifica questa legge costruendo parecchi pendoli semplici, tutti della stessa lunghezza, ma di peso diverso; si constata che il periodo d'oscillazione è lo stesso per tutti.

3° *La durata d'oscillazione è proporzionale alla radice quadrata della lunghezza;* vale a dire i pendoli di lunghezza come 1, 4, 9,..... hanno durate di oscillazioni come 1, 2, 3......

4° *La durata d'oscillazione è inversamente proporzionale alla radice quadrata della gravità;* ed è precisamente questa proprietà del pendolo, che ci dà il modo di misurare comodamente e con esat-

tezza il valore della gravità nei diversi punti della terra.

Risolvendo l'equazione suddetta rispetto a g, si ha difatti:

$$(4) \qquad g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

Ora la lunghezza l di un pendolo semplice non è difficile a misurare, la durata T di un'oscillazione si trova contando il tempo che il pendolo impiega a farne un certo numero, e dividendo quello per questo.

Fu per mezzo del pendolo che si poterono constatare le variazioni della gravità alle varie latitudini. Richter notò pel primo questo fatto interessante: un pendolo di lunghezza invariabile che egli aveva portato da Parigi a Cayenne, che si trova a 5 gradi di latitudine australe, vi era in ritardo di $2^m,28^s$ in ciascun giorno; ciò significava che a Cayenne la durata d'oscillazione era aumentata. Ora la lunghezza del pendolo essendo rimasta la stessa, per spiegare l'aumento del periodo bisognava concludere che g fosse diminuita.

La diminuzione della gravità al diminuire della latitudine proviene da due cause: dalla forma della terra un po' schiacciata ai poli e rigonfia all'equatore, per cui al polo un grave si trova più vicino al centro di attrazione che non all'equatore ed alle latitudini intermedie; e dalla forza centrifuga dovuta alla rotazione della terra intorno all'asse (§ 82). Questa, propriamente, è la causa più forte dell'aumento della gravità dall'equatore ai poli, nei quali punti essa è massima.

79. **Pendolo composto.** — Il pendolo composto, come si è detto, è un corpo pesante girevole intorno ad un punto o ad un asse orizzontale, supe-

riore al suo baricentro; ma per comodità gli si dà, per lo più, la forma di un'asticella portante in basso un ingrossamento lenticolare. Se tutti i punti del sistema fossero liberi dai vincoli molecolari, essi costituirebbero altrettanti pendolini semplici di varia lunghezza, e quindi avrebbero durate diverse di oscillazione. Essendo però invariabilmente connessi, nè potendo le loro oscillazioni essere indipendenti, ne nasce che il moto delle particelle più basse debba essere accelerato, e quello delle particelle più vicine all'asse di rotazione debba invece essere ritardato; cosicchè fra queste e quelle evidentemente trovansi delle particelle che oscillano precisamente come se fossero indipendenti. Si chiama *centro d'oscillazione* quella fra esse che giace sulla verticale abbassata dal baricentro del pendolo supposto in riposo, e *centro di sospensione* il punto dell'asse di rotazione incontrato dalla detta verticale.

La distanza fra questi due centri è la vera lunghezza del *pendolo composto;* essa è la lunghezza di un pendolo semplice che avrebbe esattamente lo stesso periodo di oscillazione. In altre parole, il centro di oscillazione di un pendolo composto è quel punto nel quale supponendo concentrata tutta la massa che lo costituisce, il pendolo semplice che ne risulterebbe sarebbe isocrono col pendolo composto. Praticamente si determina la distanza del centro di oscillazione dall'asse di sospensione, facendolo oscillare contemporaneamente ad un pendolo che si accosta alle condizioni di un pendolo semplice, e si cerca per tentativi la lunghezza che deve avere quest'ultimo, affinchè le oscillazioni abbiano la stessa durata. Siffatta lunghezza del pendolo semplice si assume per lunghezza del pendolo composto.

Si dimostra che se il pendolo composto vien sospeso pel suo centro d'oscillazione, in questa nuova posizione il primitivo centro di sospensione diventa centro di oscillazione; onde segue che nella nuova disposizione la durata d'oscillazione è la stessa di prima. Di qui la costruzione dei pendoli reversibili che hanno due assi di sospensione, l'uno fisso e l'altro mobile, a cui per tentativi si dà una posizione tale, che le durate d'oscillazione siano le stesse quando l'apparecchio è sostenuto per l'uno o per l'altro. Deriva da quanto si è detto che le leggi di un pendolo semplice sono applicabili alle oscillazioni di un pendolo composto, se per la lunghezza di questo si prende la distanza fra il centro di sospensione ed il centro di oscillazione.

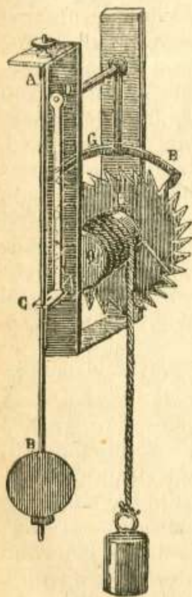


Fig. 52.

80. **Applicazione del pendolo agli orologi; scappamento ad áncora.** — Il pendolo serve negli orologi alla misura del tempo, mettendo a profitto l'isocronismo delle sue oscillazioni, quando la lunghezza resti costante. A tal uopo un verricello (fig. 52) è sollecitato a rotare da un peso *P*, attaccato ad una fune che si avvolge intorno all'asse: in *A* è sospeso un pendolo *A B* formato da una verga rigida che finisce con un ingrossamento lenticolare verso l'estremità. Esso,

oscillando, trascina con sè un'asta IC detta *la forchetta,* la quale comunica il moto ad un asse I, e all'arco GE che gli è unito, detto *áncora;* l'áncora termina con due punte ricurve che imboccano fra i denti obliqui di una ruota fissata al verricello. Per il movimento del pendolo, la punta G dell'áncora s'innalza ed abbandona la ruota che gira, ma tosto l'altra estremità E si abbassa, imbocca fra i denti e ferma la ruota: nell'oscillazione seguente questa si rialza a sua volta, ma G discende verso la ruota e s'insinua nella tacca successiva dei denti; cosi si vede che per ogni oscillazione la ruota scappa di un dente, e il suo movimento continuato è connesso alla regolarità delle oscillazioni del pendolo. Se tale movimento vien comunicato ad un indice, questo descriverà sopra un cerchio, a piccoli salti, spazi uguali in tempi uguali; basterà dunque combinare convenientemente la ruota colla lunghezza del pendolo per avere la misura del tempo in secondi. La disposizione poi dei denti della ruota e dell'estremità dell'áncora è tale, che queste ricevono un impulso ad ogni scatto di un dente: tale impulso è, per mezzo della forchetta IC, comunicato al pendolo, compensando cosi gli attriti e la resistenza del mezzo che tendono ad arrestare il moto.

Negli orologi da tasca il pendolo è surrogato da un bilanciere, il quale oscilla sotto l'azione di una molla cui è dovuta la forza motrice.

81. **Forza centripeta, legge di Newton. Forza centrifuga.** — Quando una forza è applicata ad un corpo perfettamente libero, bisogna intendere, secondo la 3ª legge della Dinamica, che una massa libera opponga per inerzia una certa resistenza ad accelerare il proprio moto, e si può esprimere questo fatto eguagliando l'impulso della forza motrice

alla quantità di moto acquistata dalla massa nell'intervallo di tempo considerato.

Supponiamo ora una massa che descriva con moto uniforme una circonferenza: affinchè ciò si verifichi, è necessario che una forza agisca sul mobile, altrimenti questo sfuggirebbe per inerzia nella direzione del moto, che è quella della tangente alla traiettoria nel punto attualmente occupato dal mobile. D'altra parte, essendo il moto uniforme, se ne deduce che tale forza non ammette una qualsiasi componente tangenziale, la quale farebbe variare la velocità; onde essa sarà normale alla circonferenza, e diretta verso il centro del circolo. Le si dà il nome di *forza centripeta* o *centrale*, e può avere origine diversa: nel moto di un pianeta intorno al sole, la forza è detta attrazione universale. Newton ha dimostrato ch'*essa è in ragione diretta delle masse del sole e del pianeta, e inversa del quadrato della distanza de' loro centri.*

Quando un corpo ruota intorno ad un asse, essa è prodotta dalla coesione e dalla resistenza de' punti di appoggio; nella fionda essa è la reazione elastica del cordoncino. Ma affinchè questa si sviluppi, è necessario che il filo si tenda, e tale tensione è prodotta dalla resistenza che, per inerzia, oppone la massa in moto a cambiare di direzione, ossia ad acquistare una accelerazione verso il centro. Tale resistenza è detta *forza centrifuga*, la quale è eguale e contraria alla forza centripeta; cessando questa, cessa anche quella, e il corpo sfugge secondo la tangente alla traiettoria nel punto che si considera.

Dimostrano i meccanici che la forza centrifuga nel moto circolare è data dalla relazione:

$$(1) \qquad F = \frac{m\,v^2}{r},$$

dove F è la forza, m la massa del corpo che ruota, v la sua velocità, r il raggio della circonferenza. Si vede che la forza centrifuga aumenta con l'aumentare della velocità, e col diminuire del raggio di curvatura: è per questo che non si possono fare troppo forti le curve delle ferrovie, e che in questi punti bisogna rallentare la corsa.

E poichè $v = \frac{2 \pi r}{T}$, essendo T il tempo periodico di un giro, la (1) può pure scriversi:

$$F = \frac{4 \pi^2 m r}{T^2}. \tag{2}$$

Se si può far ruotare, come una fionda, un secchio pieno di acqua senza che essa si versi, ciò è dovuto alla forza centrifuga che l'anima.

Così pure vediamo il cavallo e il cavaliere inclinarsi entrambi, nella corsa, verso il centro di una curva; così, sulle svolte, le tramvie si fanno inclinare verso il di dentro, affinchè il loro peso faccia equilibrio alla forza centrifuga, ecc.

82. **Variazione della gravità con la latitudine.** — Prima di lasciare questo soggetto, vediamo in qual modo l'accelerazione di gravità varii da luogo a luogo sulla superficie della terra, a cagione della rotazione di questa attorno all'asse polare, la quale si effettua in un giorno sidereo eguale a 86164 minuti secondi di tempo medio. Per tale rotazione, prende origine ne' diversi punti una forza centrifuga che è nulla ai poli, dove la gravità ha il massimo valore di $9^m,815$, e massima all'equatore, dove la gravità ha il minimo valore, eguale $9^m,781$. All'equatore la forza centrifuga è diretta in senso contrario alla gravità; nelle latitudini intermedie, un punto M della superficie terrestre non solo è animato da

una forza centrifuga minore, perchè la sua velocità effettiva è minore di quella di un punto dell'equatore, ma inoltre solo la componente verticale MN di essa forza F (fig. 53) va a diminuzione della gravità.

Si conclude che il valore della gravità deve andar crescendo dall'equatore E al polo P, co-

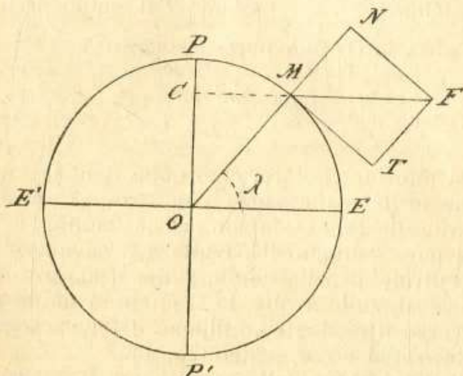


Fig. 53.

me conferma il pendolo. L'altra componente orizzontale MT fa deviare dalla verticale i corpi cadenti: la deviazione alla latitudine di 45°, ove è massima, si calcola di 0°,6'.

La fig. 54 ci dà ragione dello schiacciamento dello sferoide terrestre: l'asse polare e il diametro equatoriale stanno molto prossimamente nel rapporto di 299 : 300.

Ne segue che i punti prossimi al polo, essendo più vicini al centro, sono, per la legge di Newton sopra enunciata, maggiormente attratti; e questa

circostanza concorre pure ad aumentare in quei punti l'accelerazione di gravità.

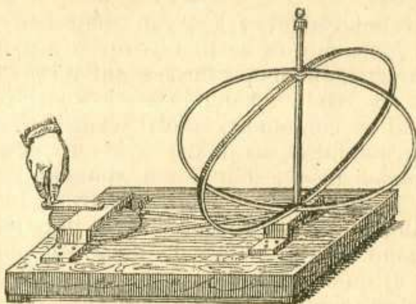


Fig. 54.

83. **Del lavoro e dell'energia di moto.** — Nell'esempio dello sparo di un'arma da fuoco si è detto (§ 53) che la quantità di moto del proiettile (azione) è uguale alla quantità di moto dell'arma (reazione): ma dall'essere eguali le loro quantità di moto, si potrà dedurre che l'effetto del proiettile sia eguale a quello dell'arma? L'urto dell'uno vale quanto l'urto dell'altra? certamente no: e fra i due urti, lo sanno tutti, corre enorme differenza. L'urto del proiettile è micidiale, quello dell'arma no: il proiettile, a differenza dell'arma, ha il potere di penetrare, spezzare, vincere delle resistenze che incontra sul suo cammino: e questo potere di vincere una resistenza è proprio di tutti i corpi che si muovono con notevole velocità. A siffatto potere si dà il nome di *energia;* e siccome una forza che vince una resistenza fa un lavoro, così può dirsi che l'*energia di un corpo in moto consiste nella sua facoltà di produrre lavoro.*

Vediamo ora come si valuti il lavoro di una forza, e supponiamo che esso consista nell'innalzare de' pesi.

Se solleviamo all'altezza di un metro un chilogrammo, facciamo un certo lavoro: e se alziamo il peso stesso a due metri, faremo un lavoro doppio; ed un lavoro triplo, alzandolo a tre metri; e così via. Quindi se chiamiamo *uno* il lavoro per alzare un chilogrammo ad un metro — lavoro che dicesi *chilogrammetro*, e s'indica col simbolo kgm. — sarà s il lavoro per elevarlo a s metri.

E similmente il lavoro per alzare due, tre, ecc. chilogrammi ad un metro d'altezza è doppio, triplo, ecc. di quello richiesto per alzarne uno all'altezza medesima; ossia per inalzare P kg. all'altezza di un metro, si farà il lavoro di P kgm. Dunque elevando un corpo del peso di P kg. all'altezza di s metri, si farà un lavoro di $P.s.$ kgm.

In generale, qualunque sia la natura di una forza, diremo che essa fa lavoro quando sposta il suo punto di applicazione; e il lavoro della forza, supposta costante, si ottiene moltiplicando la sua intensità pel cammino percorso: ossia, dicendo L il lavoro, F l'intensità della forza, s lo spazio, si ha:

$$L = F.s.$$

S'intende che F è l'intensità della forza che agisce nella direzione dello spazio s; di guisa che, se la forza e lo spazio non sono nella stessa direzione, si prenderà la componente della forza nella direzione del movimento.

Nella suddetta espressione poi, se F è la forza motrice, il lavoro è detto motore ed è positivo, perchè F ed s hanno lo stesso segno; se F è invece la resistenza vinta, il lavoro è detto resistente ed è negativo.

Nelle industrie occorre sapere il lavoro che può fare in 1^s una forza, un motore qualunque: il lavoro in 1^s è detto *potenza*. Si adotta ordinariamente come unità di potenza il *cavallo vapore* che è il lavoro di 75 kgm. in 1^s.

Supponiamo ora che una forza costante F agisca per lo spazio s su una massa m libera, comunicandole la velocità v: vogliamo trovare una relazione fra queste grandezze. Sappiamo che un corpo libero soggetto ad una forza costante, assume un moto uniformemente accelerato; e dalle equazioni di questo moto (§ 31) si deduce, supposta nulla la velocità iniziale, che:

$$s = \frac{v^2}{2\,c};$$

d'altronde sappiamo che:

$$F = m\,c.$$

Moltiplicando i primi membri di queste due relazioni fra di loro, e così i secondi, si ha:

$$F\,s = \frac{m\,v^2}{2}. \qquad (1)$$

Il primo membro della (1) è, come si è detto, il lavoro della forza nello spazio considerato; il secondo membro è detto *forza viva* od anche *energia attuale* o *energia cinetica* della massa in moto: cosicchè potremo enunciare l'importante teorema, che *il lavoro eseguito da una forza agente sopra un corpo perfettamente libero, equivale alla forza viva che gli comunica.*

Per esempio, se un corpo di peso P cade dall'altezza s, il lavoro fatto dal peso è $P\,s$; e la forza viva acquistata dal corpo $\frac{m\,v^2}{2}$ è esattamente l'equivalente di quel lavoro.

Riducendosi in quiete, la massa consumerà questa sua forza viva ed eseguirà un lavoro eguale a quello che la forza aveva speso su esso. Così nelle berte che servono a conficcare i pali sul terreno, si lascia cadere sulla testa del palo un gran peso da una certa altezza; un convoglio sulla ferrovia sèguita a muoversi, ancorchè la macchina più non agisca, finchè la resistenza di attrito non abbia esaurito la forza viva del treno, ecc.

84. **Unità adottate: il chilogrammetro, l'ergon, il joule, il watt.** — Nel valutare il lavoro di una forza se si misura la forza F in chilogrammi e lo spazio s in metri, il lavoro risulta espresso, come si è detto, in chilogrammetri. Adottando invece il sistema assoluto C. G. S., bisogna esprimere la forza in dine e lo spazio in centimetri; cosicchè il lavoro *uno* in questo sistema è il prodotto di 1 dina per 1 centimetro, ed è detto *ergon:* il prodotto di un numero di dine per un numero di centimetri è dunque un numero di ergon. Nell'industria si adotta un multiplo detto *joule* (1), equivalente a 10^7 ergon. È facile vedere la relazione tra il kgm. e il joule:

$$1 \text{ kgm} = 9{,}8 \,.\, 10^5 \text{ dine} \times 10^2 \text{ cm.} = 9{,}8 \,.\, 10^7 \text{ ergon} = 9{,}8 \text{ joule}.$$

Come unità di potenza poi si prende il lavoro di 1 joule in 1 minuto secondo; essa è detta *watt* (2). Un cavallo vapore = 75 kgm. in 1^s = 736 watt.

85. **Energia potenziale o di posizione.** — Prendiamo ora a considerare due uomini ugualmente vigorosi, i quali combattano tra loro, provveduti

(1) Da Joule grande fisico inglese.
(2) Da J. Watt celebre ingegnere inglese.

entrambi di un mucchio di pietre, che essi lanciansi l'uno contro l'altro. Però uno sia col suo mucchio di pietre in cima d'una torre, mentre l'altro sta col proprio mucchio in basso. Se si domandasse quale dei due possa più facilmente vincere la lotta, si risponderebbe subito: quello che sta in cima alla torre.

Ora qual vantaggio ha costui? Egli non è nè più poderoso, nè più destro dell'altro; il suo vantaggio lo deve solo alla posizione delle pietre di cui può disporre.

Le sue pietre difatti hanno una posizione vantaggiosa, un'energia di posizione che non hanno quelle in basso: in esse, diremmo quasi, c'è immagazzinato il lavoro stato speso per portarle in alto, e ora per spenderlo basterà soltanto farle cadere.

Supponiamo poi un mulino ad acqua, avente in vicinanza due bacini, uno ad un livello superiore, l'altro ad un livello inferiore del proprio; è chiaro che esso potrà utilizzare pel suo lavoro soltanto il bacino superiore, facendone cader l'acqua e muover le ruote.

Le cadute d'acqua sono vere sorgenti d'energia: l'energia disponibile in una caduta per ogni minuto secondo, ovvero la *potenza* della cascata, si misura facilmente moltiplicando il peso dell'acqua che cade al minuto secondo per l'altezza della caduta.

Si vede pertanto che vi è una specie di energia derivante dalla *posizione,* come ve ne è una derivante dalla *velocità:* questa abbiam detto chiamarsi energia attuale, quella si dice *energia potenziale.*

Una palla di fucile ch'esce dall'arma possiede energia attuale; un serbatoio d'acqua, un macigno collocati in alto hanno energia potenziale. Il masso

si trova in riposo in alto, com'era in basso, prima che venisse eseguito il lavoro necessario ad innalzarlo; ma cadendo, se non incontra ostacoli, acquista un'energia equivalente al lavoro che venne speso per sollevarlo a quell'altezza. E però il lavoro si trova nel masso allo stato potenziale, cioè esso possiede dell'energia in potenza: così dicasi dell'acqua in alto, della neve sul vertice di un monte. Negli esempi addotti, la gravità è la forza in virtù della quale i corpi posti in alto possiedono energia potenziale, che al momento della caduta diviene attuale; ma vi sono altri casi nei quali l'energia potenziale deriva ai corpi da forze diverse dalla gravità. Per esempio, in un arco teso vi è energia potenziale in grazia delle forze elastiche, la quale diventa attuale nella freccia che vola al momento che esso scocca: in una molla qualunque tesa v'è del pari energia potenziale.

86. **Principio della conservazione dell'energia.** — Se si lancia un grave verticalmente all'insù, la sua energia attuale va sempre diminuendo nell'ascesa, mentre cresce la sua energia di posizione: il contrario accade nella discesa. È facile dimostrare che di tanto aumenta una forma di energia, e di altrettanto diminuisce l'altra; cosicchè la somma dell'energia attuale e potenziale del grave è in ogni punto della traiettoria costante, ammesso però che il corpo non faccia scambi di energia con altri, neppure coll'aria. Per dimostrare questo fatto, basterà applicare il principio delle forze vive ad un massa m che venga lanciata verticalmente dal basso in alto con una velocità u: dicendo a l'altezza alla quale la velocità impressa u è divenuta v, si ha (§ 31) che:

$$\frac{u^2 - v^2}{2g} = a,$$

e moltiplicando ambi i termini pel peso $P = mg$ del corpo, si ottiene:

$$\frac{mu^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = Pa;$$

e poichè il mobile all'altezza a possiede l'energia potenziale Pa, si scorge che quanto esso perde nell'energia cinetica, tanto guadagna nella potenziale; laonde la somma delle due energie ha in ogni momento un valore costante. È questo un risultato di grande importanza, il quale, come vedremo, può essere generalizzato.

Ciò che si è detto in questo caso particolare, si verifica in ogni altro: per qualunque corpo o sistema di corpi che non facciano scambio di energia con altri, la somma dell'energia attuale e potenziale è costante.

Ogni qualvolta poi che paia consumarsi un'energia, se ne produce una equivalente sotto altra forma: così, per esempio, una massa di piombo che cadendo urta contro il suolo, perde nell'urto la forza viva che possedeva, ma la massa si riscalda, e questo calore così prodotto è l'equivalente dell'energia scomparsa sotto forma di forza viva. È una delle più importanti leggi della Natura questa: *l'energia si trasforma, ma non si può creare o distruggere, come non si può neppure creare o distruggere la materia.* Su questo principio riposa la scienza moderna.

Oltre le forme di energia attuale e potenziale di masse visibili che abbiamo detto, l'energia assume in Natura anche altre forme, come la coesione e l'affinità che derivano dall'attrazione rispettivamente delle molecole e degli atomi dei corpi; il calore, la luce, il magnetismo, l'elettricità, ecc.; essa prende i diversi aspetti per trasformazioni complesse, di

modo che una serie di fenomeni viene a collegarsi insieme, a coordinarsi come le anella di una interminabile catena.

87. **Principio delle velocità virtuali.** — Abbiamo veduto che nelle macchine, se le forze sono tali da farsi equilibrio, *quanto si guadagna in forza, altrettanto si perde in velocità* (§ 66). Ciò può avere una migliore dichiarazione dal *principio delle velocità virtuali,* del quale ora diremo brevemente.

Sia una forza P che agisca in un punto A nella direzione $A\,P$ (fig. 55), e imaginiamo che il punto A si sposti di una quantità piccolissima in A'; abbas-

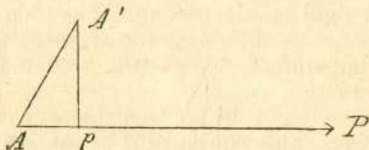


Fig. 55.

sando da A' la perpendicolare $A'p$, si dice che $A\,p$ è la velocità virtuale di A rispetto alla forza. Si vede così che la velocità virtuale è la proiezione dello spostamento ipotetico sulla direzione della forza, e può essere positiva o negativa secondo che il piede della perpendicolare p cade nella direzione della forza o sul suo prolungamento. Dalla ispezione della figura si vede subito che:

$$A\,p = A\,A' \cos A'\,A\,p.$$

Ciò posto, si abbia un sistema di punti mantenuto in equilibrio da forze che agiscono su essi: se allora si suppone che i punti di applicazione delle forze si spostino in modo conciliabile colla

connessione scambievole delle parti del sistema (un siffatto spostamento è soltanto ipotetico), la meccanica razionale dimostra che *la somma algebrica dei prodotti di ciascuna forza del sistema per la velocità virtuale corrispondente è nulla ;* e viceversa, *se tale somma è nulla per ogni possibile spostamento, il sistema è in equilibrio.*

Questa proposizione costituisce il *principio delle velocità virtuali.*

Facendone un'applicazione alle macchine, e considerando solo, come di solito, la potenza P e la resistenza Q, deve essere per l'equilibrio:

$$P \times \text{sua vel. virt.} + Q \times \text{sua vel. virt.} = o;$$

ed anche essendo le velocità virtuali di P e di Q di segno contrario,

$$P \times \text{sua vel. virt.} = Q \times \text{sua vel. virt.}$$

Verifichiamo questa relazione nell'equilibrio delle macchine semplici, e prendiamo ad esempio l'asse nella ruota e la puleggia mobile con corde parallele: il lettore potrebbe verificare con ragionamenti analoghi e senza difficoltà lo stesso principio anche per le altre macchine che abbiamo descritto.

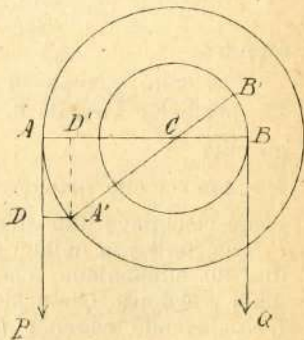


Fig. 56.

Rappresentiamo il cilindro e la ruota concentrici in sezione normale all'asse (fig. 56), e supponiamo che la potenza P

agente in A e la resistenza Q agente in B siano tali da farsi equilibrio. Se imaginiamo uno spostamento piccolissimo intorno all'asse C, pel quale A venga in A' e B in B', la linea $A'CB'$ sarà retta. Allora la velocità virtuale di A rispetto alla forza P sarà data da AD, oppure, ciò che è lo stesso, da $A'D'$, essendo $A'D$ perpendicolare alla direzione di P e $A'D'$ perpendicolare alla CA. Ora:

$$A'D' = AD = A'C.\ sen\ A'CD' = AC.\ sen\ A'CA;$$

analogamente si trova che la velocità virtuale del punto B rispetto alla Q è eguale a $CB.\ sen\ B'CB'$; allora:

$$\frac{\text{vel. virt. di } A \text{ rispetto a } P}{\text{vel. virt. di } B \text{ rispetto a } Q} = \frac{AC.\ sen\ A'CA}{CB.\ sen\ B'CB} = \frac{AC}{BC}.$$

Ma la macchina essendo in equilibrio, si sa che:

$$\frac{AC}{BC} = \frac{Q}{P}$$

quindi:

$$\frac{\text{velocità virtuale di } A \text{ rispetto a } P}{\text{velocità virtuale di } B \text{ rispetto a } Q} = \frac{Q}{P}$$

da cui:

$$P \times \text{sua velocità virtuale} = Q \times \text{sua velocità virtuale}$$

come bisognava dimostrare.

Nella puleggia mobile con tratti di fune paralleli (fig. 40) supponiamo che il punto di applicazione della resistenza Q sia fatto salire di s; la fune allora, dovendo rimaner tesa, si accorcierà di $2s$, e quindi il punto di applicazione della potenza risalirà di $2s$. Cosicchè:

$$\frac{\text{velocità virtuale di } P}{\text{velocità virtuale di } Q} = \frac{2s}{s} = \frac{2}{1};$$

ma si sa che nella puleggia mobile con tratti di fune paralleli si deve avere per l'equilibrio:

$$\frac{P}{Q}=\frac{1}{2},$$

dunque:

$$\frac{\text{velocità virtuale di } P}{\text{velocità virtuale di } Q}=\frac{Q}{P}$$

$P \times$ sua velocità virtuale $= Q \times$ sua velocità virtuale.

88. **Macchine in moto.** — Consideriamo ora una macchina in movimento, e supponiamo che il prodotto della potenza P per la proieione p sulla sua direzione dello spazio percorso dal punto di applicazione, sia eguale al prodotto analogo della resistenza Q per la proiezione q sulla sua direzione dello spazio percorso dal punto di applicazione; si ha allora per ipotesi:

$$(1) \qquad Pp = Qq.$$

Questa equazione può anche scriversi sotto l'altra forma:

$P \times$ sua velocità virtuale $= Q \times$ sua velocità virtuale,

la quale è la condizione necessaria e sufficiente, come si è detto qui sopra, affinchè la potenza e la resistenza si facciano equilibrio; quindi, nella detta ipotesi, la macchina si muove solamente in virtù della velocità che le è stata impressa inizialmente, il moto è uniforme per inerzia.

La (1) insegna, che *in una macchina qualunque che si muove con moto uniforme, il rapporto della potenza alla resistenza è eguale al rapporto inverso degli spazi percorsi dai loro punti di applicazione sulla loro direzione:* da qui anche deriva il prin-

cipio che, *tanto si guadagna in forza quanto si perde in velocità*, come si è detto innanzi.

Ricordiamo ora che il prodotto della potenza per lo spazio percorso dal punto di applicazione contato nella sua direzione, è detto *lavoro motore*, e che il prodotto analogo della resistenza per lo spazio percorso sulla sua direzione dal punto di applicazione, è il *lavoro resistente*; cosicchè il precedente teorema può anche enunciarsi: *in una macchina che si muove con moto uniforme, il lavovo motore è eguale al lavoro resistente.*

89. **Lavoro nelle macchine.** — Dalle cose dette deriva dunque che in una macchina in moto uniforme, il lavoro motore (energia spesa nell'attuarla) è sempre eguale al lavoro resistente; ma nella pratica bisogna distinguere il lavoro resistente in due, cioè nel *lavoro utile* che è quello che la macchina è destinata a produrre, e nel *lavoro perduto* che è quello consumato a mettere in moto gli organi materiali della macchina, nel superare gli attriti e gli altri ostacoli passivi.

Sempre però il lavoro motore totale, e conseguentemente l' energia spesa, è eguale alla somma del lavoro utile e del lavoro perduto. Si dice *coefficiente economico* di una macchina la frazione dell'energia impiegata nel lavoro utile; e una macchina è tanto migliore quanto più il valore di tale coefficiente si accosta all'unità.

Si vede ora quanto sia contraria al vero l'opinione di quelli che credono di potere con una macchina creare lavoro, energia, e *sognano il moto perpetuo*: una produzione continua di lavoro deve necessariamente essere accompagnata da una diminuzione continua della provvigione di energia cinetica, la quale, essendo una grandezza finita, deve esaurirsi con il tempo.

Noi non sappiamo con certezza se i corpi celesti incontrino nel loro movimento una resistenza da parte del mezzo che li circonda. Se questa resistenza non esistesse, la possibilità d' un moto perpetuo degli astri non sarebbe in contraddizione con quanto si è ora affermato, imperocchè con la supposta ipotesi non si verificherebbe alcuna dispersione di energia. Ma alla superficie della terra il moto perpetuo di un sistema è impossibile, perchè è impossibile evitare le resistenze passive, a vincere le quali bisogna necessariamente spendere dell'energia cinetica.

Al quale oggetto è bene di riportare qui alcune parole di Galileo: « La natura, per così dire, non « soffre d'essere defraudata ne' suoi effetti; di qua- « lunque modo si impieghi una causa, essa non è « capace che di un effetto determinato », e le altre di Balfour Stewart: « Noi vediamo così che le « macchine non rappresentano una fabbrica dove « si crea l'energia, ma piuttosto un mercato dove, « portando una certa quantità d'energia di certa « specie, si può cambiarla con una quantità equi- « valente d'energia di un'altra specie per noi più « conveniente; chè, se non vi si porta nulla, con « nulla certamente se ne ritorna ».

Si potranno perfezionare le macchine in guisa che il lavoro utile si accosti al lavoro motore, ma è impossibile di fare ch'esse eseguiscano oltre che il lavoro a cui sono destinate, anche quello di ripristinare la loro velocità.

Nel mettere in moto una macchina, dovendosi comunicare una certa forza viva agli organi materiali ond'essa si compone, è necessario evidentemente di adoperare un lavoro motore maggiore di quello che sarebbe richiesto dalla somma de' lavori resistenti; e però, se la potenza e la somma delle

resistenze rimanessero costanti, il moto dovrebbe accelerarsi indefinitamente. Ma ciò non accade, perocchè coll' aumentare della velocità, aumentano anche le resistenze passive; e quindi, corrispondentemente ad una data potenza costante, la macchina, dopo aver accelerato per qualche tempo il suo movimento, raggiunge tale velocità, per cui il lavoro resistente eguaglia il lavoro motore: da quell'istante in poi il moto diventa uniforme, e la macchina raggiunge il *suo equilibrio dinamico.* Accade la stessa cosa ad un grave che cada da grandi altezze nell'aria, come si è detto nel caso della caduta dei fiocchi di neve che si fa con moto uniforme; è segno allora che il lavoro della gravità è eguale al lavoro resistente dell'aria.

Pel buono andamento d' una macchina importa moltissimo che la sua velocità si conservi il più possibile costante; e siccome ad ogni variazione del lavoro motore e del lavoro resistente corrisponde un'equivalente variazione di forza viva, così è utile di dare alla macchina una gran massa, poichè allora ad una data variazione nella forza viva corrisponde solo una piccola variazione nella velocità; e per non aumentare di troppo gli organi della macchina, si aggiunge a tal uopo il *volano.*

CAPITOLO II.

Elasticità de' solidi.

90. **Elasticità.** — Si è parlato innanzi delle azioni che si esercitano fra le particelle di un corpo, dette forze di coesione, le quali si oppongono alla loro separazione, e alle variazioni di distanza delle particelle stesse. Dipendono da esse i fenomeni di elasticità, per cui un corpo deformandosi sotto l'azione di forze esterne, se non si oltrepassano certi limiti, oppone a tali forze una reazione eguale e contraria; e, al cessare della loro azione, il corpo riprende esattamente la forma e il volume di prima; cosicchè il lavoro speso per operare la deformazione, si converte tutto in energia potenziale.

Nei solidi la elasticità si può cimentare in quattro modi diversi: compressione, trazione, torsione, flessione, e ciascuna di queste azioni suscita la corrispondente elasticità.

91. **Elasticità di compressione e di trazione.** — Supponiamo che un peso P prema sulla testa un cilindro verticale che riposa su un piano invariabile (fig. 57), e imaginiamo il cilindro diviso in tanti strati orizzontali: il primo di questi $A\,B$ sarà, per effetto del peso, avvicinato al secondo $A'\,B'$; ma intanto si suscitano le forze molecolari che tendono a ripor-

tare nella prima posizione i due strati e fanno l'ufficio di una molla tesa fra essi, la quale agendo verso l'alto farà equilibrio al peso, e agendo verso il basso costringerà il secondo strato ad avvicinarsi al terzo; e così via, la compressione si propagherà fino all'ultimo e al piano che lo regge, il quale reagendo a sua volta finirà col tenere il sistema in equilibrio.

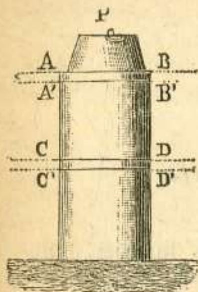


Fig. 57.

Se il cilindro fosse tenuto fisso all'estremità superiore e fosse stirato dal peso P attaccato alla base inferiore, le distanze fra gli strati aumenterebbero e le forze elastiche, anzichè repulsive come nel caso precedente, sarebbero attrattive, così da manifestarsi una tensione nel punto fisso; ma sempre l'azione fra due strati contigui farebbe equilibrio alle forze esterne.

La fig. 58 rappresenta l'apparecchio del Wertheim per lo studio dell'elasticità di trazione. Un capo del filo viene stretto alla morsetta *F* fissata al muro, e l'altro capo è serrato nella morsetta *D* che regge una gabbia munita di viti *H*, *H*; questa è destinata a ricevere i pesi che devono operare



Fig. 58.

la trazione. Rialzando le viti, si fa in modo che i pesi agiscano gradatamente; allora il filo si allunga, e la sua reazione elastica farà equilibrio alla forza di trazione.

Le leggi dell'elasticità di trazione sono comprese nella formula:

$$l = \frac{1}{E} \cdot \frac{PL}{s}$$

dove l è l'allungamento della lunghezza primitiva L del filo compresa fra due punti T e T', s la sua sezione, P il peso tensore; $\frac{1}{E}$ poi è il *coefficiente di allungamento*, il quale dipende soltanto dalla sostanza del filo e dalle sue condizioni.

La formula ci dice che l'allungamento è proporzionale al peso tensore, e quindi alla forza elastica che gli fa equilibrio. Siffatta proporzionalità della deformazione e della forza deformatrice, e quindi anche della forza elastica che le fa equilibrio, si verifica, entro certi limiti, in ogni altro caso.

La lunghezza si suole misurare in metri, la sezione in millimetri quadri, il peso tensore in chilogrammi.

Ponendo eguali all'unità le grandezze variabili del secondo membro, si vede che il coefficiente di elasticità di allungamento esprime l'aumento di lunghezza che subisce un filo lungo 1 metro, della sezione di 1 millimetro quadro, quando è stirato con il peso di 1 chilogrammo.

La reciproca del coefficiente di elasticità è detta *modulo di elasticità;* questo esprime il peso che bisognerebbe applicare per raddoppiare, se fosse possibile, senza cioè che il filo si rompesse, la lunghezza di un filo della sezione di 1 mm^2.

La stessa formula serve anche per la comprimibilità dei corpi. In questo caso l è l'accorciamento, e $\frac{1}{E}$ è detto *coefficiente di comprimibilità*, supposto che il corpo, come indica la fig. 57, sia premuto a un capo soltanto.

Se non si oltrepassa un certo limite nella trazione, il filo riprende esattamente la stessa lunghezza quando cessa l'azione del peso tensore. In caso diverso, il filo subisce una deformazione permanente, e si è convenuto di misurare il *limite di elasticità* col peso minimo che occorre per produrre, in un'ora, un allungamento permanente di 0,5 mm. per metro in un filo avente 1 mm^2 di sezione. Si è detto *in un'ora*, perchè il tempo ha, in questi fenomeni, la sua influenza.

Il limite di elasticità nei metalli si abbassa quando vengono *ricotti*, cioè raffreddati lentamente dopo averli arroventati. Invece esso si innalza colla *tempera*, che si ottiene arroventando i fili e raffreddandoli bruscamente.

Ove poi si continui ad aumentare gradatamente la tensione, il filo finisce per rompersi: si chiama *coefficiente di rottura* il peso minimo che occorre a spezzare un filo di qualunque lunghezza, e della sezione di 1 mm^2. Questo coefficiente misura la *tenacità* del metallo.

Il coefficiente di rottura è diverso a seconda che la rottura accada lentamente o bruscamente; è maggiore nel secondo caso.

Nella seguente tavola sono contenuti alcuni dati, dovuti all'esperienze di Wertheim, i quali riguardano il coefficiente di allungamento, il limite di elasticità e il coefficiente di rottura di vari metalli:

METALLI	RICOTTI Coeffic. di allungam. $1000 : E$	RICOTTI limite di elasticità	RICOTTI Rottura lenta	RICOTTI Rottura repentina	CRUDI Limite di elasticità	CRUDI Rottura lenta	CRUDI Rottura repentina
Oro	0,179	3,—	18,08	11,10	13,50	27,—	28,40
Argento	0,140	2,50	16,02	16,50	11,—	29,—	29,60
Zinco	—	—	—	14,40	—	12,80	15,77
Rame	0,095	3,—	30,54	31,55	12,—	40,30	41,—
Platino	0,064	14,50	23,50	27,70	26,—	34,10	35,—
Ferro	0,048	5,—	46,88	50,25	32,50	61,10	65,10
Acciaio fuso . .	0,051	5,—	65,70	—	52,60	83,80	—
Acciaio in fili . .	0,058	15,—	40,—	53,90	43,—	70,—	99,10

NB. — I numeri, eccetto quelli della 1ª colonna, rappresentano chilogrammi.

Se un solido è premuto egualmente su tutti i punti della sua superficie, per modo che ogni unità di superficie sopporti la pressione P, il suo volume V diminisce di una quantità α data dalla relazione:

$$\alpha = C \,.\, V \,.\, P,$$

nella quale C è il *coefficiente di compressione cubica.*

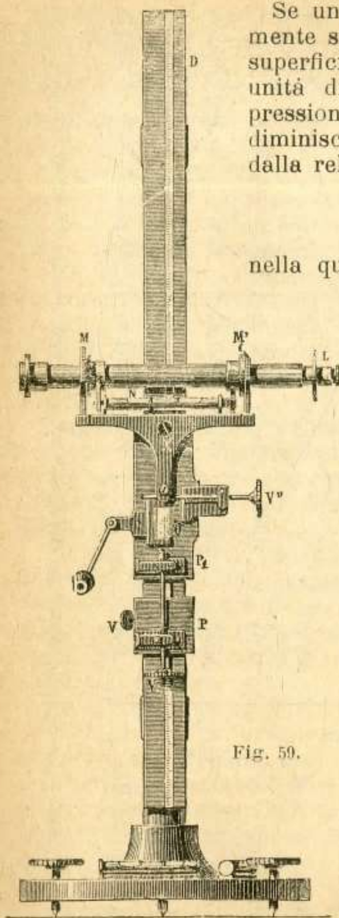


Fig. 59.

92. **Catetometro; nonio.** — L'allungamento di un filo soggetto a trazione si trova misurando con esattezza, prima e dopo l'allungamento, la distanza fra due punti segnati sul filo. All'uopo serve uno strumento detto *catetometro*, che ora vogliamo brevemente descrivere.

Esso consiste essenzialmente in un'asta metallica D divisa in millimetri, la quale si rende verticale per mezzo delle viti di orizzonte di cui è fornito il tripode che la sostiene (fig. 59). Lungo essa possono scor-

rere con dolce attrito, quando si allenta la vite di pressione V, due pezzi metallici P, P_1 uniti col mezzo di una vite micrometrica. Il pezzo P_1 porta un cannocchiale munito di reticolo, e la livelletta che gli è unita serve a stabilirne la orizzontalità dell'asse. Descritto così brevemente l'istrumento, vediamo come lo si adopera per misurare l'allungamento che un filo subisce con la trazione.

Si segnano sul filo, con lievissima scalfitura, due tratti T, T' verso le due estremità: allentando la vite V si alza il cannocchiale e si fa in modo di vedere ingrandito il segno superiore T. Allora servendosi del movimento micrometrico, e facendo, se occorre, girar dolcemente l'asta D dell'istrumento intorno alla verticale, si fa coincidere l'immagine di T con l'incrocicchio dei fili del reticolo. Si ripete la stessa operazione col segno T' abbassando il cannocchiale, e si legge nell'asta divisa la distanza fra T e T', desumendola dalla corsa del pezzo P_1, il quale all'uopo porta incisa una piccola scala (*nonio*). Questa medesima distanza si legge prima e dopo la trazione; la differenza, com'è naturale, misura l'allungamento.

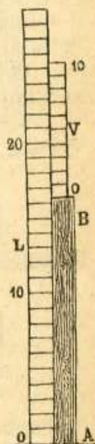


Fig. 60.

Per valutare le frazioni di millimetro, il pezzo P_1 è provveduto di un *nonio* o *verniero*, come si è qui sopra accennato. È questo un regolo lungo d'ordinario nove millimetri e diviso in dieci parti eguali, di guisa che una sua divisione è $\frac{9}{10}$ di millimetro. Per misurare una lunghezza $A\,B$ (fig. 60), si mette l'estremo A di questa davanti allo zero

della scala, e lo zero del nonio V a contatto dell'altra estremità B dell'oggetto da misurare. Si guarda di poi qual'è la divisione del nonio che meglio coincide con una delle divisioni del metro; se questa divisione è la *terza* come nella figura, è chiaro che la lunghezza $A\,B$ è di $16^{mm},3$. Infatti il segno *due* del nonio resta indietro di un decimo di millimetro, il segno *uno* di due decimi, lo *zero* dunque di tre decimi. Insomma lo zero del nonio supera sempre la divisione immediatamente inferiore della scala di tanti decimi di millimetro, qual'è il numero del nonio che coincide con una divisione della scala principale.

93. **Elasticità di flessione.** — Vediamo ora come si comporta una verga, quando si vuol fletterla: a tal proposito sosteniamo pei due suoi estremi un'asta prismatica di legno o di metallo, per modo che essa presenti di fianco il suo lato minore, e sospendiamo nel mezzo un peso conveniente (fig. 61). Di poi misuriamo, mercè una scala, di quanto si abbassa il punto di mezzo dell'asta.

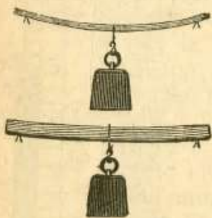


Fig. 61.

Raddoppiamo ora il peso, e rileviamo la nuova posizione dell'asta nel punto di mezzo; troveremo che esso si è abbassato il doppio di quanto erasi abbassato dianzi: ossia l'*incurvamento è proporzionale al peso applicato al corpo che s'inflette.*

Prendiamo ora la stessa asta e disponiamola sui medesimi appoggi, in modo però che presenti di fianco la maggiore sua altezza, ossia la maggiore sua superficie laterale, ed applichiamo gli stessi pesi, come dianzi. Vedremo che l'asta si infletterà

ora meno di prima, meno cioè di quando essa presentava, veduta di fianco, un'altezza minore; ma sempre la flessione sarà proporzionale al peso.

Si può pure osservare l'elasticità di flessione, fissando un sol capo della verga ad una morsa, e applicando un peso all'altra estremità come indica la fig. 62. Anche in questo modo si verifica la proporzionalità in discorso della deformazione e delle forze elastiche.

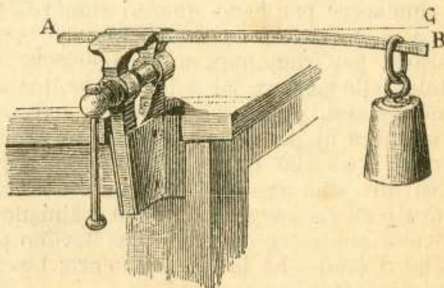


Fig. 62.

Quando la verga è un parallelepipedo di lunghezza l, di spessore verticale e, di larghezza b, la flessione α è proporzionale al peso P e al cubo della lunghezza, ed è in ragione inversa della larghezza e del cubo dello spessore. Cosicchè, indicando con $\frac{1}{F}$ il *coefficiente di elasticità di flessione*, si ha:

$$\alpha = \frac{1}{F} \cdot \frac{P\, l^3}{b\, e^3}.$$

Tutte queste formule sono state trovate con la teoria, e di poi verificate con la esperienza.

94. **Resistenza dei materiali.** — Or quando un architetto o un ingegnere deve porre in opera una gran trave di legno o di ferro nella costruzione d'un edificio, troverà di certo più vantaggioso, per la resistenza della trave, di disporla così che l'altezza di questa sia la maggiore possibile; giacchè in tal posizione essa si piegherà di meno sotto un dato carico.

L'architetto e l'ingegnere, come è evidente, devono conoscere per bene quanto riguarda la elasticità e la resistenza dei materiali che intendono adoperare, per raggiungere la maggiore solidità possibile delle costruzioni colla minor quantità dei materiali stessi, e devono quindi studiare la miglior maniera di adoperare il legno ed il ferro.

Un'altra cosa alla quale essi devono por mente nel costruire una casa od un ponte, è di farli abbastanza forti da reggere un carico almeno cinque o sei volte maggiore di quello che devono portare; e poichè il tempo ha la sua influenza, bisogna tenerne conto nelle costruzioni.

Un edificio può essere tanto robusto da reggere il peso de' pavimenti, gravati anche da notevol carico; e un ponte può resistere al passaggio di un lungo treno, senza punto guastarsi. Eppure i pavimenti dei fabbricati possono col tempo flettersi di tanto, da non poter interamente raddrizzarsi quando il carico è tolto; e similmente il ponte può essersi inflesso per modo da non ritornare al segno, quando il treno è passato. In tal caso il pavimento si rende sempre meno resistente ogni volta che su di esso rinnovasi il carico, ed il ponte diventa meno saldo ogni volta che il treno vi passa sopra. E quindi andranno grado grado incurvandosi più e più, finchè all'ultimo cederanno. Pertanto i costruttori dovranno usare gran cura affinchè codeste loro

opere non s'inflettano oltre i limiti del loro ritorno al primitivo stato.

95. **Elasticità susseguente.** — Supponiamo ora che la forza non superi il limite di elasticità, sia tale cioè da non cambiare in modo permanente la forma del corpo, ma che la sua azione si protragga per lungo tempo: accadrà allora che al primo allungamento prodotto repentinamente dalla forza quando essa comincia ad agire, il quale scomparirebbe subito al cessare di questa, altri allungamenti susseguono con lentezza, e il processo può durare delle settimane.

Al cessare poi della forza, la deformazione scompare subito in gran parte ma non del tutto: vale a dire, scompare subito quell'allungamento avvenuto in modo repentino all'inizio dell'azione, ma gli altri allungamenti prodottisi lentamente mettono a sparire un tempo quasi uguale a quello in cui si sono prodotti. Tali lente azioni che susseguono a quelle prodottesi in principio, prendono il nome di *elasticità susseguente.*

Fig. 63.

Per mostrare gli effetti della elasticità susseguente, si può ricorrere a una facile esperienza, come in-

dica la fig. 63. Sospendiamo un lungo filo di seta a una mensola fissa *A*, e carichiamolo con un peso *P*: per osservare che, dopo il primo rapido allungamento prodotto dal peso, il filo seguita a distendersi per molte ore, basterà congiungere al peso il braccio di una piccola leva col fulcro in *l*, e munita all'altra estremità di uno specchietto piano *s*. Facendo cadere un raggio di luce sullo specchio, esso si rifletterà sopra una scala posta a conveniente distanza: osservando allora gli spostamenti dell'imagine luminosa sulla scala, possiamo facilmente seguire nelle sue fasi il fenomeno.

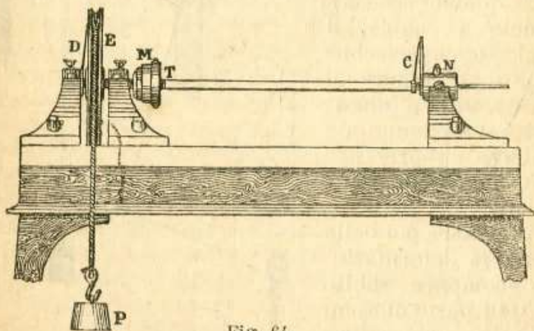


Fig. 64.

96. **Elasticità di torsione.** — Per torcere una sbarra *TN*, bisognerà serrarla a un capo entro un manicotto *N* fisso (fig. 64); la si stringe inoltre entro un altro manicotto *M*, girevole insieme con la ruota *E*, la quale è sollecitata a girare dal peso *P* che tende una fune avvolta intorno alla gola della ruota.

Il momento della forza produce la torsione della sbarra, la quale aumenta finchè le forze elastiche

non facciano equilibrio. L'angolo che misura la torsione della spranga è letto sul lembo graduato della ruota *E*, guardando la divisione che si trova dinanzi all'indice fisso *D*. La torsione dipende, oltre che dal momento della forza agente, dalla lunghezza della spranga, dalla sua sezione, dalla sua natura e struttura fisica; in ogni caso però si verifica la esatta proporzionalità fra l'angolo di torsione e il momento della forza.

Dicendo ω l'angolo di torsione, P la forza, ρ il suo braccio, L ed r la lunghezza e il raggio della sbarra supposta circolare, l'esperienza dà:

$$(1) \qquad \omega = \frac{1}{T} \frac{P \rho . L}{r^4}$$

nella quale $\frac{1}{T}$ è un coefficiente che dipende soltanto dalla sostanza e dalle condizioni fisiche della sbarra.

La (1) può mettersi sotto la forma:

$$(2) \qquad P \rho = \frac{T r^4}{L} . \omega = c . \omega,$$

indicando con c il fattore $\frac{T r^4}{L}$, il quale è costante per la stessa sbarra. La (2) insegna che il momento della forza torcente, e quindi il momento delle forze elastiche che le fanno equilibrio, è in ogni istante proporzionale all'angolo della torsione. E però, quando la forza P cessa ad un tratto di agire, il sistema compirà, prima di ridursi in quiete, delle oscillazioni isocrone intorno alla primitiva posizione di equilibrio (§ 77). La cosa non è facile a verificarsi con l'apparecchio della fig. 64, che serve solo per sbarre piuttosto grosse: ma possiamo ri-

correre all'apparecchio del Coulomb (fig. 65) ch serve per fili flessibili: il filo stretto in *A* ad un supporto fisso, viene teso da una sfera *B* munita di un indice; la sfera riposa col suo diametro verticale nel centro di un cerchio graduato. Con questo apparecchio si può verificare quanto dinanzi si è detto: all'uopo, se dopo aver torto il filo si abbandona il sistema a sè stesso, questo, ubbidendo alle forze elastiche del filo, ritorna alla posizione di equilibrio con una certa velocità, e però non può fermarvisi, ma l'oltrepassa, finchè la forza viva non sarà di nuovo convertita in energia potenziale; allora tornerà indietro e così via. Il sistema insomma compirà delle oscillazioni e l'indice si moverà come un pendolo orizzontale innanzi e indietro alla posizione di riposo, finchè l'attrito e la resistenza del mezzo non avranno spente tali oscillazioni.

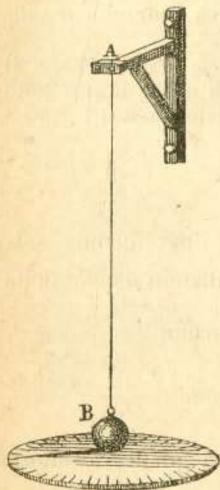


Fig. 65.

E il fatto interessante è che, mentre le oscillazioni del pendolo devono essere piccole per l'isocronismo, quelle dovute all'elasticità di torsione possono avere un'ampiezza qualunque, da qualche frazione di grado sino ad abbracciare più circonferenze. Questo isocronismo è la conferma che il momento delle forze elastiche di torsione è in ogni istante proporzionale all'angolo di torsione; precisamente come nelle piccole oscillazioni di un pendolo, la forza che sollecita la sfe-

retta pesante è, in ogni istante, proporzionale alla sua distanza dal punto più basso, ossia dal punto di equilibrio (§ 77).

Per concludere, ciascun punto del sistema $A\ B$ che abbiamo considerato, acquista un moto oscillatorio pendolare, perchè si trova nelle stesse condizioni dinamiche di un pendolo che compia oscillazioni di piccola ampiezza.

CAPITOLO III.

Idrostatica.

97. **Come si debba intendere la quiete dei liquidi.** — Abbiamo già detto che in tutti i corpi le molecole sono incessantemente animate da moto; ma mentre ne' solidi esse non fanno che oscillare intorno a punti fissi, ne' liquidi invece si aggirano le une intorno alle altre, e si spostano continuamente in seno alla massa, così da trovarsi, dopo un certo tempo, ben distanti dalla primitiva posizione, senza che l'equilibrio sia menomamente turbato. Imaginiamo ora nella massa liquida condotto un piano in una direzione qualunque; se esso verrà attraversato tanto nell'uno che nell'altro senso dallo stesso numero di molecole, il liquido sarà animato dalle sole agitazioni molecolari, e si dirà che è in quiete; in caso diverso sarà animato da un movimento progressivo nel senso del passaggio più numeroso di molecole. È in questo modo che si deve intendere lo stato di quiete o di moto di un liquido.

Una proprietà caratteristica de' liquidi è quella di essere pochissimo comprimibili; cioè, se vengono assoggettati a pressioni anche forti, le variazioni del loro volume sono così piccole da richiedere apparecchi squisiti per poter essere apprezzate.

98. **I liquidi sono poco comprimibili ed elastici.** — Per mostrare la piccola comprimibilità de' liquidi, si ricorre all'apparecchio della fig. 66 detto *piezometro*.

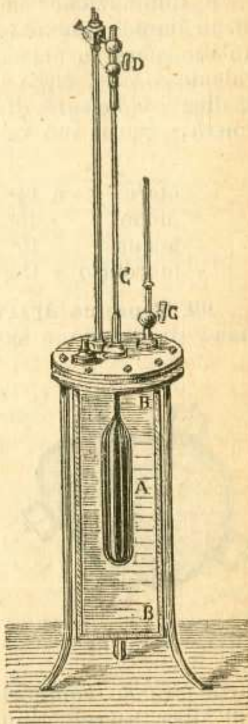


Fig. 66.

Il liquido da cimentare è contenuto in un'ampolla di vetro *A*, che si prolunga in un sottile cannello *C*, ben calibro e munito in alto di chiavetta. L'ampolla è racchiusa in un recipiente *B B* pieno d'acqua, e comunicante col tubo *G* di diametro esattamente eguale a *C*. Esercitando una pressione con una pompa nell'interno dell'ampolla, il liquido si abbassa in *C*, mentre l'acqua sale in *G* per l'aumento di volume della bolla *A* determinato dalla pressione. Se il liquido fosse incomprimibile, gli spostamenti dei livelli in *C* e in *G* dovrebbero essere eguali; invece quello di *C* è maggiore; e la differenza, che è sempre piccolissima, è eguale alla diminuzione di volume del liquido contenuto in *A*, la quale risulta proporzionale alla pressione. Se si toglie la pressione, si fa cioè che l'interno dell'ampolla comunichi con l'aria libera, il liquido torna allo

stesso livello di prima, tanto in C quanto in G: ciò mostra che sono elastici e liquido e vetro.

La diminuzione che subisce l'unità di volume di un liquido quando si esercita la pressione di un'atmosfera su ciascuna unità di superficie (equivalente a 1 kg. circa su ogni centimetro quadrato) si dice *coefficiente di comprimibilità*. Indicandolo con K, ecco il suo valore per alcuni liquidi:

		K
etere	a 14°	0,000126
alcool	» 15°	0,0000899
acqua	» 15°	0,0000457
mercurio	» 15°	0,00000184

99. **Teorema di Pascal.** — Sia ora un vaso pieno di liquido, e supponiamo che in una parete venga praticato un foro, e questo sia munito di una tubulatura nella quale scorra, senza attrito e a perfetta tenuta, uno stantuffo. Se noi eserciteremo una pressione su questo stantuffo, il liquido sottoposto cederà pochissimo, come sappiamo, e prenderanno tosto origine in tutti i punti della massa liquida delle forze elastiche, le quali da una parte faranno equilibrio alla pressione esterna, e dall'altra eserciteranno delle pressioni sulle pareti del vaso: queste a loro volta opporranno una reazione pari all'azione. Cosicchè, se invece di una sola apertura, il vaso ne ha parecchie della medesima area, munite pure di tubulature chiuse da altrettanti stantuffi (fig. 67), e si esercita una pres-

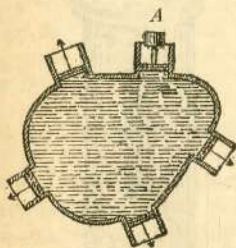


Fig. 67.

sione su uno qualunque di essi, una pressione eguale si desterà perpendicolarmente a ogni stantuffo nella direzione delle freccie, e per l'equilibrio bisognerà su ciascuno applicare all'esterno una forza eguale e contraria.

Questa legge, che è una conseguenza della elasticità dei liquidi, è dovuta a Pascal, e si enuncia dicendo che, *ne' liquidi le pressioni si trasmettono egualmente in tutte le direzioni.*

Possiamo verificare questa legge riempiendo un cilindro di una miscela d'acqua e di alcool, che abbia la stessa densità dell'olio di oliva. Una piccola massa di quest'olio assumerà allora in seno alla miscela suddetta la forma sferica, e vi rimarrà sospesa senza andare nè su nè giù. Se con uno stantuffo impegnato nel cilindro comprimiamo il miscuglio d'acqua e di alcool, la goccia d'olio nè si sposta nè si deforma: il che prova che la pressione dello stantuffo è trasmessa per mezzo del liquido in tutte le direzioni e con eguale intensità in ogni punto.

Ora, se ciascuna area S presa nell'interno del liquido o sulla parete è premuta normalmente con la forza F, un'area doppia, tripla, ecc. sopporterà una pressione doppia, tripla, ecc.; si potrà dunque dire che le *forze sono proporzionali alle aree.* Cosicchè, se si esercita la pressione F sull'area S, ciascuna unità di area sopporterà la pressione $\frac{F}{S}$, e quindi un'area S' sarà premuta con la forza F' data dalla relazione:

$$F' = \frac{F}{S} . S'.$$

Si vede che se le forze sono proporzionali alle aree sulle quali agiscono, producono la stessa pressione

su ogni unità di superficie; e si deduce pure che disponendo convenientemente del rapporto $\frac{S'}{S}$, si può con una forza piccola esercitarne una grandissima.

100. **Torchio idraulico.** — Si profitta di questo fatto nel torchio idraulico, detto anche torchio di Bramah dal suo inventore (fig. 68). Consiste essenzialmente in due corpi di tromba di diversa sezione, comunicanti fra loro, ne' quali si muovono due

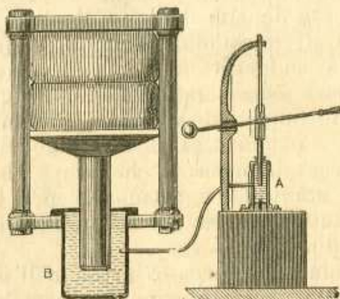


Fig. 68.

stantuffi, uno grande e l'altro piccolo. Supponiamo, per fissare le idee, che l'area del maggiore sia cento volte quella del minore: applicando allora, per esempio, 20 kg. su questo, si dovrà porre un peso cento volte maggiore su l'altro per tenerlo a posto; cosicchè, quando si manovra la pompa *A*, l'acqua iniettata in *B* farà sollevare lo stantuffo più grosso con la forza enorme di 2000 kg. e con tal forza premerà i corpi posti tra la piattaforma che si solleva con esso, e il piano superiore tenuto a posto dalle colonne. In questa macchina

è necessario che ogni parte sia molto robusta affinchè possa opporre una reazione pari alla pressione che sopporta, e sia ben serrata, — *tenga* perfettamente, come dicono i pratici — perchè in caso contrario l'acqua sfuggirebbe con immensa forza per le fenditure. All'uopo è necessario che le guarniture di cuoio che abbracciano gli stantuffi siano fatte a dovere, e si mantengano in condizioni appropriate. Il torchio idraulico è molto usato nelle industrie, e serve a comprimere balle voluminose, a estrarre olii dai semi vegetali, ecc. ecc.

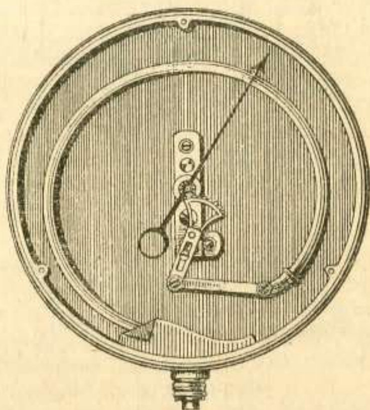


Fig. 69.

101. **Manometri metallici.** — Poichè le pressioni esercitate sulla superficie di un liquido si trasmettono con eguale intensità in tutti i sensi, la loro misura si può fare indifferentemente in un punto qualunque del liquido premuto. Servono a questo

scopo speciali istrumenti detti *manometri,* e i più diffusi nell'industria sono quelli metallici di Bourdon (fig. 69). La parte essenziale è costituita da un tubo metallico ed elastico, a sezione ellittica, piegato ad anello, chiuso a un capo e aperto all'altro col mezzo di un rubinetto, attraverso il quale arriva entro il tubo il liquido di cui si vuol misurare la pressione. Questa tende a raddrizzare il tubo, il cui estremo chiuso tira una leva ad angolo che fa ruotare un indice dinanzi ad un arco graduato.

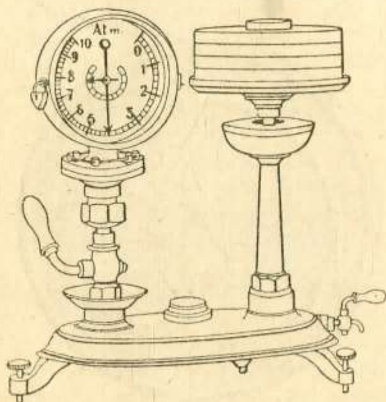


Fig. 70.

La graduazione di questi manometri metallici si fa con l'apparecchio rappresentato dalla fig. 70, costituito da un tubo ad *U* pieno di acqua, sulla quale da una parte si fanno agire successivamente dei pesi conosciuti, e tali da produrre ciascuno per es. la pressione di 1 atmosfera, e dall'altra parte è applicato il manometro da graduare.

102. **I liquidi hanno una superficie di livello.** — Sia ora una massa liquida in equilibrio, soggetta soltanto all'azione della gravità.

La superficie libera con la quale termina superiormente deve essere, per l'equilibrio, una *superficie di livello*, vale a dire essa deve essere in ogni punto normale alla forza agente. Difatti ricordiamo che un filo a piombo, quale si usa dai muratori e dai geometri, sorretto sovra la superficie dell'acqua, è normale a tale superficie. Si intende che per l'equilibrio la superficie libera d'un liquido deve ubbidire a tale condizione, perchè in caso diverso, risolvendo la forza in due componenti, una normale alla superficie, l'altra parallela ad essa, alla prima componente farebbe equilibrio il liquido sottoposto, ma la seconda sarebbe libera di agire, e l'equilibrio non potrebbe verificarsi. La forma della superficie di livello sarà in ogni caso determinata dalla condizione suddetta: essa è un piano orizzontale, come lo prova l'esperienza, se la massa di liquido è poco estesa; è sferica nel caso di grandi estensioni, come l'oceano.

Quando poi, insieme con la gravità, altre forze agiscono sui punti della superficie libera, come per es. succede ne' tubi capillari, la superficie di livello avrà forma diversa, ma soddisferà sempre alla condizione di essere in ogni punto normale alla risultante delle forze agenti.

103. **Pressioni destate dalla gravità in un liquido.** — Consideriamo una massa liquida contenuta in un vaso di forma qualunque, e proponiamoci di vedere qual sia la pressione che sopporta un'area limitata in un piano orizzontale parallelo alla superficie di livello, ad una data profondità.

A tal uopo imaginiamo divisa la massa del liquido in tanti sottili strati paralleli alla superficie

di livello: il 1° premerà il 2°; questo trasmetterà la pressione del 1° e premerà con il proprio peso il 3°, e così via. Si vede dunque che mano a mano che si scende, gli strati sono sempre più premuti: e poichè ciascuno di essi ha un peso proporzionale alla propria estensione (§ 99), ne viene che eserciterà in seno alla massa sottostante una pres-

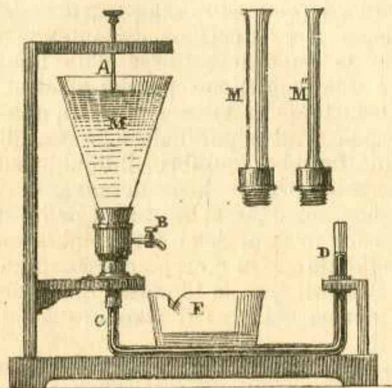


Fig. 71.

sione indipendente dalla propria estensione. Cosicchè, dicendo p il peso specifico del liquido, la pressione P che sopporta l'area orizzontale a che si trova alla profondità h, sarà data dalla relazione:

$$P = a\,h.\,p.;$$

la pressione cioè è eguale al peso del prisma liquido soprastante, il quale ha per base l'area considerata e per altezza la distanza dell'area dalla

superficie di livello. Risulta che la pressione è la stessa in un punto qualunque di un piano orizzontale parallelo alla superficie di livello; e di più che la pressione sul fondo dei vasi è indipendente dalla loro forma. Si può verificare questa cosa facilmente in più modi: si può, per esempio, ricorrere all'apparecchio di De Haldat. Questo consiste in un tubo di vetro *C D* (fig. 71) ricurvo verticalmente alle sue due estremità, terminato in *D* da un ramo di vetro, e riunito in *C* ad un tubo di ferro sul quale si avvitano de' vasi di forma diversa, aventi però tutti una stessa area per base. Si versa del mercurio nel detto tubo *C D*: la superficie terminale di

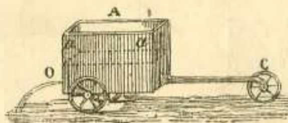


Fig. 72.

questo liquido forma in *C* il fondo del vaso, ed è essa che sopporta la pressione idrostatica dell'acqua che riempie il vaso superiore fino alla punta *A*. Qualunque sia la forma de' vasi, facendo arrivar l'acqua sempre fino alla punta *A*, si vedrà salire il livello del mercurio allo stesso punto *D*.

Siccome poi tali pressioni si trasmettono egualmente in tutte le direzioni (§ 99), ne viene che anche le pareti laterali de' vasi sono premute. Per verificare questo fatto, si prenda un vaso pieno d'acqua montato su un carrettino (fig. 72): finchè il liquido non sgorga dall'orifizio *O*, il carrettino sta fermo, perchè ad ogni pressione su un punto della parete ne corrisponde una eguale e contraria su un punto

opposto; quando però l'efflusso ha luogo, la pressione non può più esercitarsi in O ma continua a esercitarsi nel punto opposto; cosicchè il carrettino si mette in moto nella direzione contraria all'efflusso. Sulla pressione laterale è fondato l'*arganetto idraulico:* esso è un vaso girevole intorno ad un asse, e l'efflusso dell'acqua da fori che si aprono all'estre-



Fig. 73.

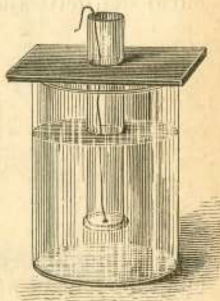


Fig. 74.

mità di bracci di leva convenientemente disposti, ne determina la rotazione (fig. 73). Ciò valga per le pressioni laterali.

Inoltre, sempre per il principio di Pascal, un piano orizzontale dovrà, nell'equilibrio, essere spinto verso l'alto con la stessa forza che lo preme verso il basso. Per verificare la cosa, prendiamo un cilindro di vetro vuoto, aperto alle due estremità, e chiudiamone temporaneamente il fondo coll'applicarvi un

sottile dischetto, trattenuto per mezzo di un filo passante nell'interno del cilindro (fig. 74). Indi, tenendo tesa la cordicella, tuffiamo il cilindro nell'acqua contenuta in un vaso, e vedremo che si può rallentarla ed abbandonarla senza che il dischetto si stacchi dal fondo, perchè vi è tenuto dalla pressione che l'acqua esercita da sotto in su.

Versiamo poi nel cilindro dell'acqua colorata; il dischetto chiude lo stesso, e solo si staccherà quando l'acqua colorata giungerà entro il cilindro presso il livello dell'acqua esteriore; perchè allora la pressione ch'esercita all'insù contro il dischetto l'acqua esterna viene equilibrata dalla eguale pressione esercitata all'ingiù dall'acqua postavi dentro, e prevale il peso del disco.

Quando ci troviamo in una barca sopra un'acqua profonda, potremo facilmente persuaderci della enorme pressione dell'acqua a grandi profondità. Prendiamo una bottiglia ordinaria, empita per tre quarti d'acqua, e serriamola bene con un tappo di sughero; indi legatone il collo con una lunga funicella, lasciamola discendere nel fondo. Se la profondità sarà sufficiente, la pressione dell'acqua esterna spingerà il tappo dentro la bottiglia; di poi ritirandola su, la troveremo piena di acqua, e serrata di nuovo dal tappo spinto all'infuori dalla pressione interna.

104. **Paradosso idrostatico.** — Se si versa un litro d'acqua in ciascuno dei tre recipienti rappresentati dalla fig. 75, la pressione sul fondo sarà diversa nei tre casi. Difatti, se, la base comune è eguale ad un decimetro quadrato, per esempio, il livello nel vaso cilindrico si eleva ad un decimetro, e la pressione sul fondo sarà eguale al peso del liquido, cioè a 1 kg.; se il vaso si allarga tanto che l'altezza del liquido si riduca ad un cm., la

pressione sul fondo si ridurrà a 0,1 kg.; se invece esso si restringe in modo che l'acqua vi salga a 1 m., la stessa pressione sarà di 10 kg.; eppure l'acqua nei tre casi pesa egualmente.

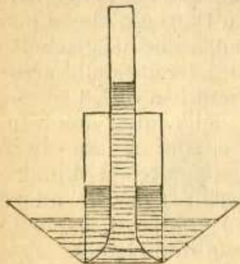


Fig. 75.

Quest'apparente contraddizione, detta *paradosso idrostatico,* proviene dal fatto che la pressione sul fondo è una quantità ben diversa dal peso del liquido; questo, come per ogni altro corpo, è dato dalla bilancia, la quale fornisce la risultante verticale di tutte le pressioni che si esercitano, non sul fondo soltanto, ma anche sulle pareti laterali.

105. **Vasi comunicanti.** — Dovendo poi per l'equilibrio la pressione essere la stessa in tutti i punti di un medesimo piano orizzontale, ne viene che uno stesso liquido contenuto in due o più tubi che comunicano tra loro, si disporrà in tutti colla superficie libera ad un medesimo livello, siano poi questi tubi inclinati o diritti, e di qualunque forma. Per convincersi di ciò, basta versare acqua in uno di questi vasi di forma assai diversa (fig. 76); vedremo che essa giunge in tutti allo stesso livello.

Se ne è fatta un'applicazione nella livella ad acqua, rappresentata dalla fig. 77. Essa serve a determinare la differenza di livello di due punti lontani, e consiste in un tubo di metallo terminato agli estremi con due cilindri di vetro. Lo si colloca in posizione quasi orizzontale su un tripode, e vi si versa dell'acqua: le due superficie libere si troveranno esattamente in uno stesso piano orizzontale, cosicchè

la visuale che passa per esse, mettendo l'occhio a un estremo, è orizzontale. Volendo determinare la

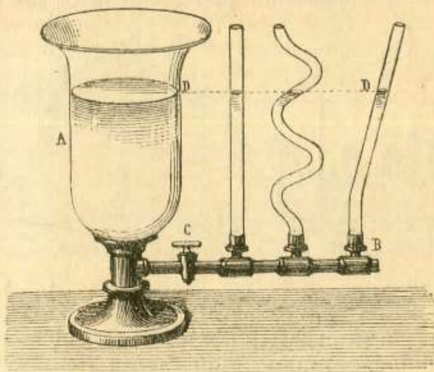


Fig. 76.

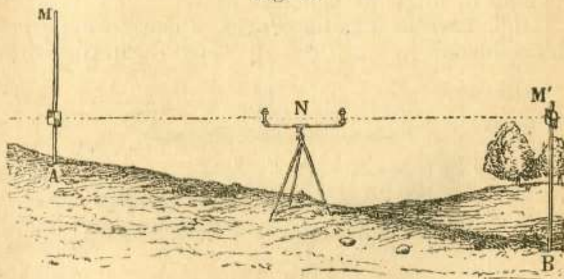


Fig. 77.

differenza di altezza di due punti *A*, *B*, si mette l'istrumento in un luogo intermedio, e si drizzano verticalmente due biffe *M*, *M'* ne' punti suddetti. Si traguarda, e si fa cenno ad un assistente che alzi

o abbassi i quadratini di mira, finchè il loro centro coincida col piano dell'acqua. Si leggono poi sulle biffe le due altezze dal suolo, e si fa la differenza.

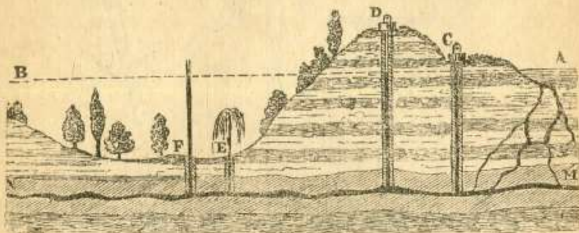


Fig. 78.

La teoria de' vasi comunicanti dà anche la spiegazione delle fontane zampillanti, de' pozzi artesiani, ecc. ecc., come mostra la fig. 78, che non ha bisogno di ulteriori spiegazioni.

106. **Livella a bolla d'aria**. — Questo apparecchio consiste in un tubo di vetro ricurvo, come

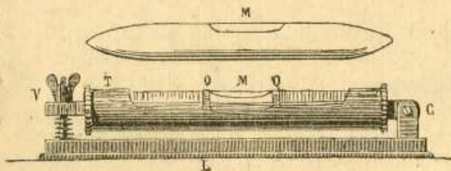


Fig. 79.

indica la parte superiore della fig. 79. Si riempie questo tubo di un liquido molto scorrevole, alcool o etere, lasciandovi una grossa bolla d'aria che tenderà sempre per la sua leggerezza a porsi nel punto più alto. Il tubo, dopo averlo chiuso, viene

introdotto in un astuccio metallico T, di guisa che la curvatura M sia visibile all'esterno. L'astuccio è fissato ad un regolo di ottone, parallelo al piano tangente nel mezzo M del tubo. In tali condizioni, se la livella è posta su un piano orizzontale, anche il detto piano tangente risulta orizzontale, M si trova nel punto più alto del tubo, e il mezzo della bolla d'aria coincide con esso: due tratti O, O' incisi sul vetro corrispondono allora agli estremi della bolla. Da una parte poi e dall'altra di O, O' sono tracciate delle divisioni equidistanti.

Per rendere orizzontale un piano con questo strumento, si posa la livella su esso in una direzione qualunque, e se la bolla d'aria si dirige verso l'estremità C, ciò vuol dire che il piano è troppo alto da questa parte; lo si fa allora scendere finchè la bolla venga tra i due tratti O, O'. Si ripete la stessa operazione ponendo la livella in una direzione presso a poco perpendicolare alla prima; e per accertarsi che con questa seconda operazione non si è distrutta la orizzontalità prima stabilita nell'altra direzione, si ricolloca la livella in questa: dopo pochi tentativi si perviene a realizzare la condizione che due rette del piano non parallele siano orizzontali entrambe; ne viene che lo è anche il piano.

Poichè le dilatazioni diverse del vetro e del metallo, dovute a variazioni di temperatura, possono alterare il parallelismo del regolo L e del piano tangente in M, si può con una vite V far girare lentamente il tubo intorno a C e regolare in tal modo la livella. D'altronde, prima di impiegarla, si deve verificarne sempre l'esattezza servendosi del *metodo di inversione.* Se disponendo la livella sopra un piano *presso a poco orizzontale*, l'estremità a destra della bolla affiora alla divisione n, bisogna,

affinchè l'istrumento sia ben regolato, che girandolo di 180°, l'altra estremità della bolla che ora viene a destra dell'osservatore, affiori anch'essa ad una divisione che porta lo stesso numero. Si perviene in ogni caso a realizzare questa condizione col girare gradatamente la vite *V* che si è detta.

107. **Principio d'Archimede.** — Vogliamo ora vedere quale è la risultante delle pressioni a cui è sottoposto un corpo immerso in un liquido.

Sospendiamo al di sotto di uno de' piattelli di una una buona bilancia un solido di forma qualunque, e facciamogli equilibrio mettendo de' pesi su l'altro piattello. Immergiamolo ora nell'acqua di un vaso, e vedremo che l'equilibrio della bilancia è rotto; essa s'inclina dalla parte opposta a quella del solido; sembra che questo quando è immerso pesi meno, poichè, a ristabilire l'equilibrio, occorre caricare di pesi il piattello che lo porta. Ma il corpo non ha realmente perduto di peso; l'apparente perdita è dovuta al fatto che, *un corpo qualunque immerso in un liquido, si trova premuto in tutti i punti della sua superficie, e la risultante di tali pressioni è una forza verticale (spinta) diretta dal basso all'alto, d'intensità eguale al peso del liquido spostato dal corpo, e passante pel punto che occuperebbe il centro di gravità del corpo immerso, se questo fosse omogeneo, punto detto centro di volume.* Questa proposizione è il principio di Archimede, e si suol verificare nel modo seguente.

Abbiamo qui (fig. 80) due cilindri d'ottone, l'uno massiccio *D*, l'altro cavo *C*, nel cui vano entra esattamente il primo. Questi due cilindri sono sospesi l'uno sotto l'altro ad un piatto della bilancia mediante un piccolo gancio, stando sopra il cilindro cavo; sull'altro piatto sono posti i pesi o la zavorra che riducono all'equilibrio la bilancia.

Facendo ora sommergere il cilindro pieno nell'acqua contenuta in un vaso sottoposto *V*, la bilancia trabocca dall'altra banda, perchè il cilindro immerso risente dall'acqua, una spinta diretta verso l'alto; e per ristabilire l'equilibrio si dovrà riem-

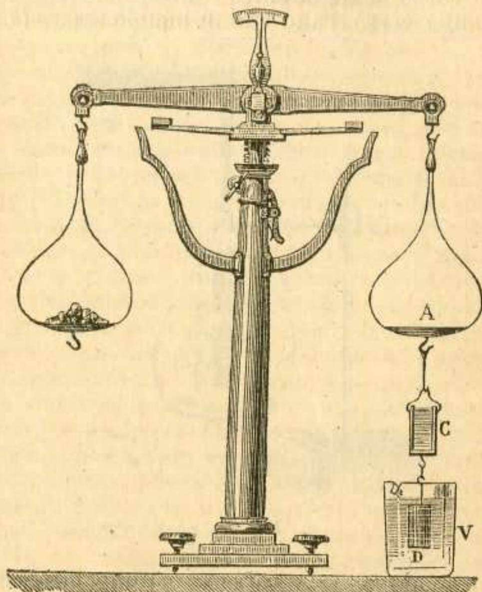


Fig. 80.

pire d'acqua il cilindro cavo. Ora il volume di questa cavità essendo eguale al volume del cilindro immerso, potremo concludere che quest'ultimo, stando nell'acqua, subisce una spinta verticale all'insù, eguale al peso di un volume di

acqua pari al suo, come vuole il principio di Archimede.

Mettendo in un piatto d'una bilancia un vaso contenente acqua ed un corpo qualunque, l'equilibrio evidentemente non viene turbato, tanto se questo corpo si trova entro o fuori del vaso. Ora, alla spinta verso l'alto che il liquido esercita sul

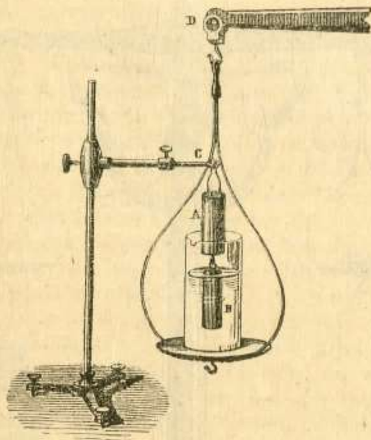


Fig. 81.

solido immerso, eguale al peso del liquido spostato, dovrà, per l'equilibrio, corrispondere una eguale e contraria pressione sul fondo del vaso. Si verifica anche qui il principio dell'azione e della reazione eguali e contrarie.

Per confermare sperimentalmente questa conseguenza, sospendiamo i due cilindri della figura antecedente ad un sopporto fisso *C* (fig. 81) ed equi-

libriamo sulla bilancia il vaso d'acqua. Appena si immerge in questa il cilindro massiccio B, si vedrà il giogo della bilancia traboccare dalla parte del vaso; e per ristabilire l'equilibrio, bisognerà togliere dal recipiente una quantità di liquido tale che riempia esattamente il cilindro cavo A.

108. **Galleggiamento de' corpi sull'acqua.** — Un corpo di peso P, immerso nell'acqua — e lo stesso dicasi di un altro liquido qualunque — ne sposta un peso Q: lasciandolo libero, esso discenderà se P sarà maggiore di Q, come accade di una pietra, di una palla di ferro, ecc.; resterà in equilibrio se P sarà eguale a Q, come succede all'incirca per una palla di bosso o di olivo; ma che cosa accadrà se il corpo sarà più leggiero dell'acqua a parità di volume? esso sarà sollecitato verso l'alto e finirà col *galleggiare* sul liquido, rimanendovi immerso quel tanto che occorre a spostarne un peso eguale al proprio. Ecco una palla di legno di pino, la quale pesa meno dell'acqua a volume eguale; se la immergiamo nell'acqua, si sente che la spinta di sotto in su, dovuta alla pressione dell'acqua, è maggiore del peso della palla, cosicchè lasciandola libera essa verrà a galleggiare. Dunque, se il corpo è specificamente (cioè a parità di volume) più pesante dell'acqua, cadrà al fondo; se il suo peso è eguale a quello dell'acqua, pure a volumi eguali, nè cadrà, nè galleggierà; e se infine è specificamente meno pesante dell'acqua, starà a galla.

Un galleggiante poi è in equilibrio tanto più stabile, quanto più basso è il suo centro di gravità; così un tubo di vetro, chiuso ad un estremo e contenente nel fondo un po' di mercurio, galleggia nell'acqua in posizione verticale; similmente nelle navi si ottiene una grande stabilità zavorrandole, ossia caricandole con i pesi maggiori verso il fondo, ecc.

109. **Spinta degli altri liquidi.** — Gli altri liquidi si comportano come l'acqua: i più leggieri, come l'alcool, l'etere, ecc., esercitano una spinta minore; i più pesanti, come ad esempio il mercurio, ne esercitano una maggiore.

Per convincersi di ciò, basta versare un po' di mercurio in un vaso, e porre sulla sua superficie un pezzo di ferro; si vede che il ferro vi galleggia, perchè, a parità di volume, pesa meno del mercurio.

L'acqua salsa ha un peso specifico maggiore dell'acqua dolce: quella del Mar Morto ha un tal peso specifico, che una persona vi sta a galla comodamente.

110. **Peso specifico.** — Ricordiamo che, per definizione, il *peso specifico* di un corpo è il peso della sua unità di volume (§ 20). Il peso specifico così definito è quello assoluto, e non va confuso con il peso specifico relativo, che è la ragione del peso di un corpo al peso di un egual volume di acqua distillata a 4°. Quando però si adotta il sistema metrico decimale, siccome per una massa di acqua il volume in dm^3 o in cm^3 e il peso in chilogrammi o in grammi sono espressi dallo stesso numero, ne viene che, con la detta convenzione, uno stesso numero esprime per ogni corpo il peso specifico assoluto e quello relativo. Osserviamo inoltre che dipendendo il volume di un dato corpo dalla temperatura, il peso specifico varia necessariamente con questa; noi supporremo che si tratti del peso specifico a 0°, che cioè il corpo si trovi a questa temperatura, e supporremo che l'acqua distillata sia alla temperatura di 4°: vedremo poi la relazione che passa tra il peso specifico di un corpo a 0° e quello ad una temperatura qualunque.

111. **Peso specifico dei solidi.** — Ciò posto,

vediamo ora come si possa determinare il peso specifico dei solidi, supposti omogenei. Se il peso P e il volume V sono conosciuti, si ha subito il peso specifico dividendo il primo pel secondo, conformemente alla definizione: il volume si può trovare facilmente se non è troppo piccolo, e se i solidi hanno una forma regolare; allora, se anche il peso è conosciuto, si calcola subito il peso specifico. Si può anche determinare il volume V misurando lo spostamento dell'acqua prodotto dal corpo: all'uopo si versa dell'acqua in un vaso cilindrico graduato fino ad una data divisione, e vi si immerge il corpo in esame; la quantità di cui sale il livello dell'acqua, dà immediatamente il volume.

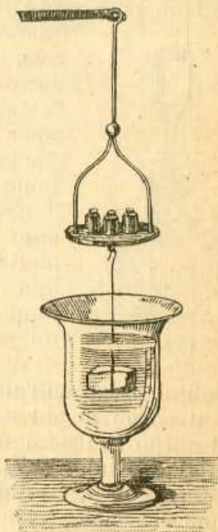


Fig. 82.

Ma risultati più esatti si ottengono sperimentando secondo uno dei metodi che ora descriveremo:

1° *Metodo della bilancia.* — Del corpo, supposto sempre omogeneo, ossia di uniforme densità, si prende una massa conveniente, e se ne determina il peso P nell'aria: poi lo si sospende ad un piatto per mezzo di un filo leggiero (fig. 82), e lo si immerge nell'acqua. L'equilibrio è rotto a cagione della spinta; il peso P' di cui bisogna caricare il piatto per ristabilire l'orizzontalità del giogo, misura la spinta, ossia il peso di un volume d'acqua

eguale a quello del corpo. Il rapporto $\frac{P}{P'}$ è dunque il peso specifico cercato.

2° *Metodo della boccetta (picnometro).* — È adoperato frequentemente quando si ha de' solidi ridotti in polvere. — Si ricorre pure a questo metodo quando si tratta di corpi molto porosi, ossia che hanno nel loro interno molte cavità. Allora, se nel determinare il peso specifico si vuole tener conto soltanto della materia che costituisce il corpo e fare astrazione dalle cavità, bisogna ridurre il corpo in polvere. Trovatone il peso P nell'aria, lo si pone sul piattello della bilancia insieme con una boccetta a collo largo e con tappo smerigliato, forato e avente un segno sul tratto sottile (fig. 83), e si stabilirà l'equilibrio con dei pallini messi sull'altro piatto. Indi, tolti la boccetta e il corpo in polvere, s'introduce questo in quella; il corpo scaccerà alquanta acqua; si asciuga e si ripone il tutto sul piatto della bilancia. Il peso P' occorrente a ristabilire l'equilibrio il peso dell'acqua scacciata, aventi un volume eguale a quello del corpo; quindi il peso specifico è dato dal rapporto $\frac{P}{P'}$. Per facilitare l'uscita dell'aria dai pori rimasti, dopo avere immersa la polvere nell'acqua della boccetta, si tiene questa per un certo tempo sotto la campana della macchina pneumatica.


Fig. 83.

Tali metodi non possono essere eseguiti così semplicemente quando si tratti di un solido che si scioglie nell'acqua, oppure è più leggiero di questa.

Nel primo caso, o si riveste il corpo di un sottile strato di vernice, tale da non alterarne in modo apprezzabile il peso e il volume, oppure se ne determina il peso specifico rispetto a un liquido nel quale esso non si scioglie; e si troverà il suo peso specifico relativo all'acqua, moltiplicando il peso specifico rispetto al liquido pel peso specifico di questo rispetto all'acqua.

Se il corpo fosse più leggiero dell'acqua, ecco come si opera: dopo averne al solito trovato il peso nell'aria, si misura la spinta che subisce nell'acqua un pezzetto di metallo prima solo, poi in unione al corpo leggiero. La differenza della spinta nei due casi è il peso di un volume d'acqua eguale a quello del corpo, e però si ha subito il peso specifico di questo.

112. **Determinazione del peso specifico dei liquidi; areometri; densimetro.** — Per misurare il peso specifico de' liquidi, si usano metodi analoghi a quelli de' solidi:

1° *Metodo della bilancia.* — Si sospende al piattello della bilancia, con un filo, un'ampolla di vetro chiusa contenente alquanto mercurio o pallini di piombo; dopo averla equilibrata con della tara (pallini di piombo) messa su l'altro piattello, la si immerge successivamente nel liquido di cui si vuole sapere il peso specifico e nell'acqua, determinando ciascuna volta la spinta. È chiaro che così si viene a misurare i pesi di volumi eguali del liquido e dell'acqua, e però il peso specifico è dato dal loro rapporto.

2° *Metodo della boccetta.* — Si può adoperare una piccola boccia a collo stretto (fig. 84), che si riempie del liquido in esame fino a un punto segnato, e si chiude con tappo smerigliato per im-

pedire l'evaporazione del liquido; se occorre, si toglie l'eccesso con carta bibula, e bisogna ben guardare che non vi restino bolle d'aria. Si pesa la boccetta così riempita, e togliendone il peso del vetro che deve essere conosciuto, si sa il peso del liquido. Vuotandola di questo, si riempie di acqua, e si determina parimenti il peso dell'acqua. Non resta allora che a fare il rapporto de' due pesi per avere il peso specifico del liquido in discorso.

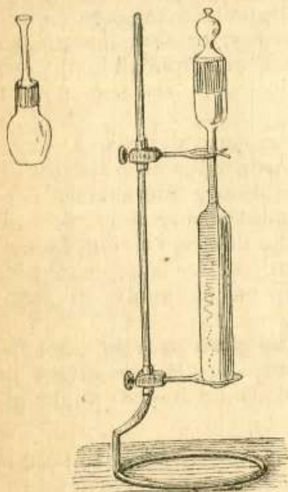


Fig. 84.

Per trovare il peso specifico de' liquidi, sono anche molto usati gli *areometri a peso costante*. Sono cannelli di vetro a diametro esterno il più costante possibile, zavorrati nel fondo; entro il cannello si fissa e si chiude un foglio con la graduazione. Posti a galleggiare in un liquido, essi vi si immergono tanto più quanto questo è meno denso.

Il *volumetro* dà il rapporto che hanno i volumi di pesi uguali dei diversi liquidi. Se è cilindrico, come quello della fig. 85, si scrive 100 al punto di affioramento sull'acqua, e si divide la parte sommersa in 100 parti eguali. Se immergendolo in altro liquido affiora fino alla divisione n, la densità di questo liquido sarà eguale a $\frac{100}{n}$. Infatti, se indi-

chiamo con v il volume compreso fra due divisioni, è chiaro che il peso del liquido spostato, eguale a quello dell'istrumento, sarà $n\,v\,p$, chiamando con p il peso specifico del liquido. E poichè nell'acqua esso si affonda fino alla divisione 100, il peso dell'istrumento sarà anche espresso da $100\,v$; in conseguenza è $100\,v = n\,v\,p$; e semplificando, $100 = n\,p$, si vede pertanto che per avere p, bisogna dividere 100 per n.



Fig. 85.

L'istrumento ha però quasi sempre una forma come quella della fig. 86, diversa dalla cilindrica. Per graduarlo vi s'introduce tanto mercurio che nell'acqua distillata si affondi il solo rigonfiamento, e in quel punto si segna 50. Pesato l'istrumento, se ne raddoppia il peso aggiungendo altro mercurio; allora mettendolo di nuovo nell'acqua, esso ne sposterà un volume doppio, e quindi al punto ove affiora si segnerà 100.



Fig. 86.

Non resta che dividere l'intervallo in 50 parti eguali e prolungare le divisioni al disopra di 100: in tal caso il volumetro potrà servir tanto per i liquidi più densi, che per quelli più leggieri dell'acqua.

Per lo più, di fronte a ciascuna divisione sono segnati direttamente i numeri che danno la densità, cioè il risultato della divisione $\frac{100}{n}$; in tal caso l'istrumento è detto *densimetro*.

113. **Alcoolometro centesimale.** — L'*alcoolometro centesimale* è un areometro graduato in modo da indicare comodamente e precisamente quante parti in volume di alcool assoluto sono contenute in 100 parti di un miscuglio di acqua e di alcool, come sono l'acquavite, lo spirito del commercio, ecc.

Per graduare lo strumento, si versano in una serie di vasi cilindrici divisi in parti eguali 0, 10, 20, 30..... 100 centimetri cubi di alcool assoluto, e si finiscono di riempire con acqua distillata sino a fare un volume totale in ogni cilindro di 100^{cm^3}. Si regola il peso dell'areometro in modo che nella provetta contenente pura acqua si affondi sino a un piccolo tratto sopra il rigonfiamento, e ivi si scrive 0; si segna 100 nel punto di affioramento nell'alcool assoluto, e 10, 20, 30... ne' punti di affioramento dell'istrumento, corrispondenti alle diverse mescolanze. Le divisioni che si ottengono a questo modo non sono eguali, e si ammette che la proporzione centesimale di alcool — sempre intesa a volume — contenuta in una soluzione di alcool e di acqua, sia espressa dal numero segnato al punto di affioramento.

Tutte queste determinazioni sono fatte a 15°; e si capisce che la questione si complica quando la temperatura del miscuglio è diversa, perchè varia con essa la densità del liquido. Gay-Lussac ha studiato queste variazioni, ed ha costruito delle apposite tavole, le quali danno, per ciascuna temperatura, la proporzione giusta di alcool contenuta in 100 parti del miscuglio.

Una volta che si abbia un alcoolometro già graduato, per graduarne un altro, basta vedere sin dove questo s'immerge nell'acqua distillata e nell'alcool assoluto. Segnati 0 e 100 in questi due punti, le altre divisioni si ottengono dividendo semplice-

mente l'intervallo compreso fra i detti punti in parti proporzionali, come indica la fig. 87, nella

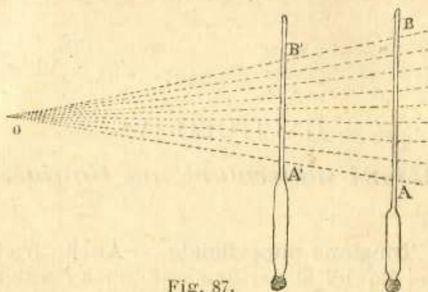


Fig. 87.

quale *A B* rappresenta l'alcoolometro campione, e *A' B'* quello che si tratta di graduare.

Sono in uso anche alcoolometri centesimali a *peso*, anzichè a *volume*.

CAPITOLO IV.

Azioni molecolari nei liquidi.

114. **Tensione superficiale.** — Anche fra le molecole dei liquidi si verifica una certa coesione, dovuta alle loro scambievoli attrazioni, come appare manifesto dalla tendenza che hanno i liquidi a raccogliersi in goccie sferiche, e più ancora dalla grande quantità di calore che si richiede per vaporizzarli, come vedremo in appresso.

Tali azioni molecolari producono effetti sensibili soltanto a distanze piccolissime (mm. 0,001 circa); cosicchè se prendiamo a considerare una molecola nell'interno della massa liquida, e intorno a lei come centro, tracciamo una sfera con un raggio eguale alla massima distanza a cui essa fa sentire la sua azione (*raggio limite di attrazione*), sarà come se la molecola presa di mira risentisse l'azione delle sole molecole contenute in quella sfera, detta *sfera dell'azione sensibile.*

Finchè questa sfera è tutta compresa nella massa liquida, una molecola M'' (fig. 88) sarà sollecitata egualmente in tutte le direzioni dalle forze molecolari, e però tutto accadrà come se queste non esistessero. Ma ben diversamente andrà la cosa quando si tratta di molecole come M, M', per le quali la suddetta sfera della azione sensibile non è tutta

compresa nella massa liquida: allora le azioni molecolari più non si compensano, e ne risulta per lo strato superficiale una tensione molecolare particolare, parallela alla superficie libera, tale da renderlo sino a un certo punto paragonabile ad una pellicola elastica mantenuta in tensione.

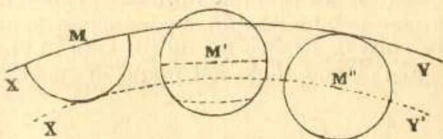
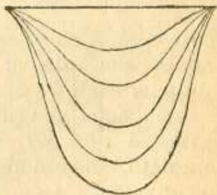


Fig. 88.

Si verifica facilmente che la superficie libera di un liquido è in realtà la sede di una tensione che si esercita con eguale intensità intorno a un punto nel senso della superficie. Osserviamo a tal fine la forma che va prendendo una goccia d'acqua che esce lentamente da uno stretto tubo: essa è rappresentata nei successivi istanti dalla fig. 89, ed assomiglia perfettamente a quella che prenderebbe una sottilissima laminetta di gomma fissata agli orli di un anello rigido, in cui a poco a poco si versasse dell'acqua.


Fig. 89.

Ecco un altro esempio: se si immerge un pennello nell'acqua e lo si estrae, i peli aderiscono gli uni agli altri; e poichè quando era immerso nell'acqua, essi restavano separati, è necessario concludere che fuori dell'acqua si raccolgono, perchè la *membrana* elastica superficiale tesa li circonda e li raccoglie insieme.

La tensione superficiale è resa più evidente dal contegno che presentano le lamine liquide, le bolle di sapone in particolare, le quali mostrano evidentemente una specie di contrattilità, poichè si riducono ad un diametro minore, se si lascia aperto il cannello con cui si soffia. Si può vedere la stessa cosa anche così: si tuffi un anello fatto con un filo metallico nell'acqua saponata; se prima si è avuta la cura di fissare un filo di seta in un punto dell'anello e di adagiarlo nel piano di questo, si ha,

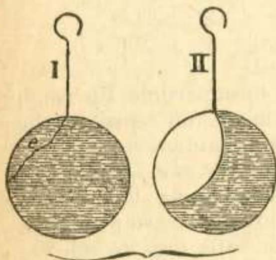


Fig. 90.

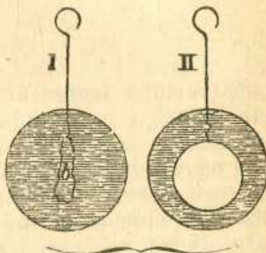


Fig. 91.

quando si ritrae l'anello, una lamina di acqua saponata aderente al contorno dell'anello e al filo. Rompendo allora con un pezzetto di carta la lamina in una parte, si vedrà la porzione rimasta integra contrarsi (fig. 90); e si otterrà un foro circolare completo, disponendo l'esperienza come indica la fig. 91.

Un ago da cucire può, per la tensione della superficie liquida, galleggiare in posizione orizzontale sulla superficie dell'acqua, quantunque la sua densità sia di molto superiore a quella dell'acqua; e quando esso cade al fondo, si vede che è

prima la punta a discendere, perchè perfora quella specie di pellicola dove si esercita la tensione molecolare. Così è che l'*idrometra* passeggia a suo agio sulla superficie dell'acqua (fig. 92).

Quando si fa cadere una goccia d'olio d'oliva sull'acqua, poichè la tensione superficiale fra l'acqua e l'aria è ben maggiore della somma delle tensioni superficiali fra olio ed aria e olio e acqua, succede che la goccia si espande sulla superficie dell'acqua e la ricopre tutta con un velo tenuissimo; la quale cosa si può constatare facendovi cadere un'altra

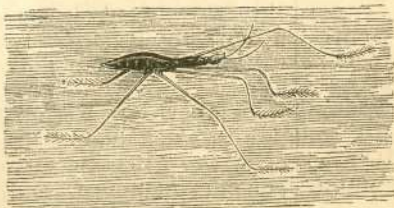


Fig. 92.

goccia che più non si espande. L'esperienza riesce anche meglio con l'essenza di trementina; siffatte lamine sottili risplendono, come le bolle di acqua saponata, dei più vaghi colori dell'iride.

A cagione di tale espansione degli olii, de' grassi, delle essenze, sulle superficie dotate di maggior tensione, il mercurio e l'acqua sono soggetti a imbrattarsi con la massima facilità.

Gli olii grassi hanno maggior tensione delle essenze; e però se si circonda una macchia d'unto con la benzina, se ne riduce l'estensione, e applicando nel centro un po' di carta asciugante si porta via l'unto.

Vogliamo anche notare che un aumento di temperatura diminuisce la tensione superficiale; e però si verifica uno spostamento verso la parte fredda che esercita una tensione maggiore. Così il disco di cartone di un lumino da notte si muove come indica la freccia (fig. 93), quando non abbia il lucignolo nel mezzo, perchè questo scalda allora la superficie dell'olio più in *A* che in *B*, e prevale la tensione in questo punto. Il fatto che la tensione superficiale diminuisce con la temperatura, si mette, per esempio, a profitto per levare una macchia di cera col mezzo di un ferro caldo da stirare e di un foglio di carta asciugante.

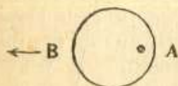


Fig. 93.

115. **Fenomeni capillari.** — Nel contatto dei solidi con i liquidi si produce una serie di fenomeni detti *fenomeni capillari,* perchè si osservano specialmente in tubi di diametro assai piccolo quasi paragonabile a quello di un capello. Col nome di *capillarità* poi s'intende non solo il complesso di tali fenomeni, ma ancora la forza a cui essi sono dovuti. Questi fenomeni sono svariatissimi; in ogni caso però essi sono dovuti all'attrazione delle molecole liquide fra loro, e a quella che si esercita fra esse e i corpi solidi.

Noi ci limiteremo a descrivere soltanto i fenomeni in tubi sottili. Se si tuffano nell'acqua cannelli di vetro di piccolo diametro e ben tersi, si vede subito che l'acqua sale nei tubi ad un livello superiore a quello esterno, e tanto maggiormente quanto più piccolo è il diametro interno del cannello (fig. 94). Al contrario, tuffando gli stessi tubi nel mercurio, questo non solo non s'innalza, ma si tiene più depresso nel loro interno, e tanto più

quanto più angusto è il vano (fig, 95); il mercurio però salirebbe alcun po' entro cannelli formati di argento e di oro.

Si osserva inoltre che le superficie libere ne' tubetti capillari non sono piane: con tubetti di vetro, sono concave nel caso dell'acqua, convesse nel caso del mercurio. A tali superficie si dà il nome di *menischi*.

Ora si constata con l'esperienza che il menisco concavo si forma quando il liquido bagna il tubo (p. es. vetro e acqua); e il menisco convesso si

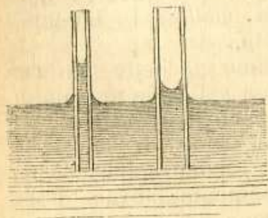


Fig. 94.

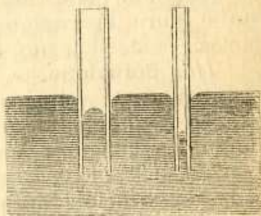


Fig. 95.

forma quando il liquido invece non bagna il tubo (p. es. vetro e mercurio). E avviene sempre che *il menisco concavo trae con sè un innalzamento, il menisco convesso invece una depressione rispetto alla superficie esterna.*

Per intendere come ciò accada, prendiamo a considerare un grosso tubo, separato in due parti da una membrana elastica, e supponiamo che esso sotto alla membrana sia pieno d'acqua e col capo inferiore sia pure immerso nell'acqua. Allora, se si solleva il tubo, il liquido sotto la membrana sale, e questa si fa concava perchè di sotto la pressione diminuisce; se invece lo si tuffa di più

in maniera che quella membrana si trovi sotto al livello esterno, la pressione idrostatica la renderà convessa; ma tanto nel primo quanto nel secondo caso, la membrana si deformerà fino al punto da ristabilire per elasticità l'equilibrio. In un tubo capillare è il menisco che fa le veci della membrana, con questa differenza però che esso è dotato di una tensione costante, e non potrà aver luogo l'equilibrio che per un certo dislivello determinato da questa tensione.

Si intende ora che l'olio, il petrolio, ecc., salgono ne' lucignoli delle lampade per capillarità; e questa è pure la ragione della *imbibizione* de' solidi porosi, come il legno, la creta, ecc.

116. **Soluzione.** — Abbiamo già detto che cosa si intenda per soluzione di un solido in un liquido (§ 24); aggiungiamo qui che anche fra liquido e liquido avvengono fenomeni simili di soluzione. L'acqua e l'alcool, l'acqua e l'acido solforico, per esempio, si sciolgono perfettamente; invece l'olio d'oliva non si scioglie nell'acqua. Se però si mescolano insieme olio e alcool acquoso della stessa densità, e si agita per bene il miscuglio, l'olio non si separa più; esso si divide in tante goccioline minutissime, che si possono vedere con un microscopio; cotali mescolanze sono dette *emulsioni*. Il latte è un'emulsione naturale.

Quando due liquidi sono mescibili, cioè solubili uno nell'altro, il loro miscuglio avviene più intimamente, e non è più possibile di discernere e di separare con mezzi meccanici le sostanze mescolate.

117. **Diffusione.** — Talvolta due liquidi mescibili l'uno nell'altro si mescolano spontaneamente, anche in onta all'azione della gravità: tale fenomeno si chiama *diffusione*. Così, versando con cau-

tela del vino sull'acqua contenuta in un bicchiere, in principio i due liquidi restano separati pel loro diverso peso specifico; ma a poco a poco la colorazione del vino scende verso il basso, e si ha un miscuglio omogeneo. Se in una provetta di conveniente capacità ed altezza si pone dell'acqua tinta con tintura di tornasole, e poi cautamente, senza agitare la massa, per mezzo di un cannello di vetro si fa arrivare nel fondo un po' di acido solforico, si vede ivi la tintura arrossarsi per l'azione dell'acido: lasciando a sè la provetta e impedendo ogni agitazione meccanica, si vedrà lentamente la colorazione rossa salire sino alla cima, segno evidente che le molecole dell'acido solforico, sebbene più pesanti, si spingono in alto tra le molecole dell'acqua. Parimenti, se nel fondo di una provetta piena di acqua si gettano dei cristalli di solfato di rame, o di bicromato potassico, avverrà la soluzione colorata di questi sali negli strati più bassi: ma poi le molecole del sale lentamente saliranno sino agli strati superiori, finchè l'intiera colonna liquida avrà la medesima composizione, e quindi la stessa colorazione in tutti i punti.

In ogni caso la diffusione del sale avviene dai punti di maggiore concentrazione verso quelli di minore concentrazione, e con tanta maggior velocità quanto più grande è la differenza della concentrazione stessa fra i punti che si considerano. La concentrazione esprime la massa di sale contenuta nell'unità di volume della soluzione.

118. **Dialisi.** — Ma alcune sostanze, quelle che possono cristallizzare, come i sali, e però dette *cristalloidi*, si diffondono abbastanza rapidamente; al contrario altre, e propriamente quelle non cristallizzabili e per ciò dette *colloidi*, come l'albumina, la gomma, la colla, ecc., si diffondono molto

pigramente. Si trae profitto di questa circostanza per separare colla *dialisi* le sostanze cristalloidi dalle colloidi: all'uopo basterà disporre il loro miscuglio nel fondo di una provetta e versarvi sopra acqua; le cristalloidi sciogliendosi si elevano nell'acqua, e lasciano nel fondo le colloidi. L'operazione riesce meglio se fra l'acqua e il miscuglio si pone uno strato di colloide, come sarebbe la pergamena vegetale che è carta comune trattata con acido solforico diluito: attraverso a un tale setto si diffondono soltanto i corpi cristalloidi. Mezzo litro d'orina posta nel *dializzatore A* (fig. 96) galleggiante sull'acqua della catinella *B*, cede all'acqua in 24 ore tutti i sali che tiene disciolti.





Fig. 96.

119. **Diosmosi.** — Non bisogna confondere con questi fenomeni la *diosmosi*, che consiste nel mescolarsi di due liquidi separati da un tramezzo poroso, come sarebbe una membrana animale, porcellana poco cotta, ecc. In tal caso i pori si riempiono in diverso grado de' due liquidi, a seconda della varia adesione fra essi e il solido, dalla quale dipende il diverso *assorbimento;* in questi meati capillari accade il miscuglio de' due liquidi, il quale sboccando dalle due parti vi si diffonde poi con diversa velocità, cosicchè si stabiliscono due opposte correnti: quella più copiosa si chiama *endosmosi*, l'altra *esosmosi*. Si mostrano queste correnti coll'*endosmometro* di Dutrochet, rappresen-

tato dalla fig. 97. Consiste esso in un cannello di vetro terminato in un imbuto, che si chiude con un setto poroso; si riempie sino a un certo punto di un liquido, p. es. alcool, una soluzione di zucchero, di salmarino o di qualche altro sale nell'acqua, e si tuffa l'imbuto chiuso dal setto nell'acqua contenuta in un bicchiere. Si vede allora il liquido salire a poco a poco nel cannello, ovvero discendere a seconda della natura de' liquidi e del tramezzo poroso: accade però sempre, con le ordinarie membrane, una doppia corrente mentre cioè un liquido entra nel cannello attraverso il setto poroso, l'altro ne esce.

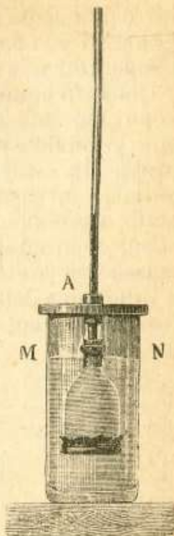


Fig. 97.

È detto *equivalente endosmotico* di una sostanza il peso dell'acqua che attraversa la membrana, mentre ne esce 1 gr. della sostanza medesima. Ecco, secondo Jolly, il valore dell'equivalente endosmotico attraverso a una vescica di bue per alcune sostanze:

Equivalenti endosmotici attraverso una vescica di bue (secondo Jolly).

Cloruro di sodio	4,22
Solfato di sodio	11,05
Solfato di potassio	12,70
Solfato di magnesio	11,65
Potassa idrata	231,40
Alcool	4,13
Zucchero	2,25

L'equivalente endosmotico varia alquanto con il grado di concentrazione della soluzione; anche la temperatura vi ha una piccola influenza.

Questi fenomeni sono importantissimi perchè servono non solo alla spiegazione di molti fatti della vita vegetale e animale, ma costituiscono inoltre la prova più evidente che le molecole dei liquidi sono animate incessantemente da moto: esse, come si è detto, aggirandosi le une intorno alle altre possono, dopo qualche tempo, trovarsi in punti della massa ben lontani da quelli che prima occupavano, a differenza delle molecole de' solidi che si agitano oscillando rapidamente intorno a punti fissi.

CAPITOLO V.

Aerostatica.

120. **Comprimibilità ed elasticità degli aeriformi.** — Abbiamo detto che i fluidi aeriformi sono caratterizzati dalla estrema mobilità delle loro particelle, e dalla tendenza che hanno ad espandersi in un volume maggiore. S'immagina che le loro molecole si muovano in tutte le direzioni come altrettanti proiettili, facendo collisioni fra di loro e colle pareti del recipiente, sulle quali in conseguenza esercitano in ogni direzione una pressione, la quale ne misura la forza espansiva od elastica.

Propriamente sono detti *gas* que' corpi che, come l'aria, l'idrogeno, l'ossigeno, ecc., si trovano allo stato aeriforme nelle condizioni ordinarie e non si possono facilmente liquefare; quegli aeriformi invece che facilmente si possono liquefare, sono detti *vapori*: es. il vapor d'acqua. Notiamo che questo è invisibile come l'aria.

I gas sono comprimibili ed elastici, e lo si può mettere in evidenza con l'apparecchio della fig 1. Se con la mano si preme sullo stantuffo, questo si affonda facilmente; ma se si cessa di premere, lo stantuffo risale subito al punto di prima. Gli altri gas si comportano egualmente: in ogni caso

l'esperienza prova la grande comprimibilità e la perfetta elasticità loro.

In grazia di tali proprietà e della scorrevolezza delle loro particelle, applicasi ai gas il teorema di Pascal: quando cioè si comprime un gas, il suo volume diminuisce fino a che si desti una forza elastica capace di equilibrare la pressione esterna; in tali condizioni, ogni elemento di superficie comunque diretto nell'interno della massa gassosa, risentirà normalmente sulle due faccie una pressione costante. E se si considera la pressione dal gas sulle pareti del vaso, queste le fanno equilibrio con la reazione elastica.

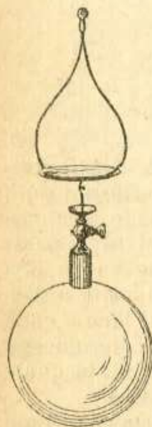


Fig. 98.

121. **Peso dell'aria e degli altri gas.** — I gas sono corpi pesanti: per trovare, per esempio, il peso di un dato volume di aria, si sospende ad un piatto della bilancia (fig. 98) un pallone di vetro munito di chiavetta, e vuotato di aria col mezzo di una buona pompa. Dopo averlo equilibrato con della tara messa sull'altro piatto, si fa rientrare aria pura e secca, e si vede di quanto è aumentato il suo peso.

Usando tutte le debite cautele, Régnault trovò che un litro di aria secca, a 0° e alla pressione normale di 76 cm. di mercurio (§ 122) pesa gr. 1,293. Analogamente si determinarono i pesi degli altri gas, nelle condizioni normali suddette: essi sono registrati nella seguente tabella, nella quale è pure notata la loro densità relativa all'aria.

GAS	Peso in grammi di un litro nelle condiz. norm.	Densità relativa all'aria
Aria secca	1,293	1
Ossigeno	1,430	1,1056
Azoto	1,256	0,9713
Idrogeno	0,08958	0,06916
Cloro	3,18	2,453
Ossido di carbonio . . .	1,254	0,967
Anidride carbonica . . .	1,977	1,524
Metano	0,716	0,558
Ammoniaca	0,791	0,590

122. **Atmosfera, pressione atmosferica.** — L'atmosfera circonda la terra come un oceano di aria, nel fondo del quale noi viviamo e ci muoviamo. Essa è un miscuglio di 236 parti in peso di ossigeno per 764 di azoto, con qualche traccia di anidride carbonica e di ammoniaca, e contiene del vapore acqueo in quantità variabile a seconda della stagione, de' luoghi, del buono o cattivo tempo, ecc.

La pressione e il peso dell'atmosfera sono simili a quanto si osserva in un oceano d'acqua: gli strati superiori premono col loro peso i sottostanti, e ne nasce la pressione atmosferica, la quale è maggiore a livello del mare e minore sui monti; ma in un medesimo strato orizzontale non troppo esteso ha, in un dato istante, lo stesso valore, ed in grazia dell'elasticità si esercita egualmente in tutte le direzioni. Siffatta pressione è veramente enorme; basti dire che la pressione che sopporta 1^{m^2} supera i 10.000 kg. Ora, come accade che noi non ci accorgiamo punto di questa pressione, e possiamo muoverci con tanta facilità in seno all'aria? Come avviene che corpi esilissimi non siano schiac-

ciati? La ragione è che tale pressione si esercita in tutte le direzioni: su un foglio di carta, per es., la pressione dell'aria agisce non solo su una faccia ma anche sull'altra, talchè tutto accade come se esso non risentisse alcuna pressione; ed è per la stessa ragione che noi premuti egualmente in ogni verso, possiamo muoverci liberamente, come se la pressione non esistesse. Ma se chiuderemo la base di un cilindro di vetro con una sottile pellicola, e applicheremo l'altra base sul piatto della macchina



Fig. 99.



Fig. 100.

pneumatica, come indica la fig. 99, quando si rarefà l'aria con la pompa, la pellicola scoppia perchè la pressione dell'aria esterna non è più equilibrata da quella dell'aria interna: è questa l'esperienza del *crepa-vesciche*.

Riempiendo d'acqua un bicchiere (fig. 100) ed applicandovi un foglio, lo si potrà capovolgere senza che l'acqua si versi. Ciò prova che la pressione si esercita non solo dall'alto verso il basso, ma anche nel senso contrario: il foglio impedisce che l'acqua suddividendosi permetta all'aria di arrivare in cima al bicchiere.

In una pipetta (fig. 101) fa l'ufficio del foglio il menisco del liquido; ma se si vuole che questo non si versi, bisogna chiudere con un dito l'estremità superiore. Nelle due ultime esperienze l'efflusso del liquido non accade perchè la pressione dell'aria supera la pressione idrostatica del liquido.

Un'altra esperienza che serve a mostrare gli effetti della pressione atmosferica, è quella

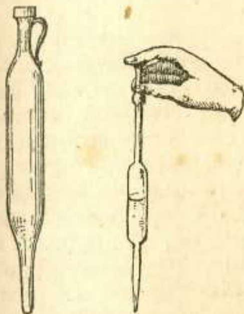


Fig. 101.



Fig. 102.

degli *emisferi di Magdeburgo:* consistono questi in due mezze sfere cave (fig. 102), i labbri delle quali si adattano esattamente l'uno all'altro.

Facciamoli combaciare bene, e chiudiamo la chiave che toglie la comunicazione fra l'interno e l'esterno. Probabilmente si domanderà: perchè la pressione dell'aria esterna non tiene fortemente serrati insieme questi due emisferi? La ragione è questa che v'ha dell'aria anche nell'interno, e che

essa colla propria tensione li preme all'infuori, appunto nella misura con cui l'aria esterna li preme all'indentro. Ora adattiamo alla macchina pneumatica uno di questi emisferi, quello cioè che porta il tubo munito di chiave, e applichiamovi sopra l'altro emisfero: apriamo la chiave ed estraiamo più che si può l'aria interna. Chiusa di nuovo la chiave, e tolti dalla macchina gli emisferi, ecco che vuolsi un grandissimo sforzo per istaccarli l'uno dall'altro; e difatti nel mentre l'aria esterna li preme come dianzi, è diminuita grandemente la tensione dell'aria interna, e quindi gli emisferi restano fortemente premuti l'uno contro l'altro.

123. **Barometro.** — Tutte queste esperienze, e moltissime altre che si imaginano facilmente, provano che l'aria atmosferica esercita, in virtù del suo peso, una pressione che per elasticità si trasmette in tutti i sensi, ma non sono acconcie a darne la misura. Questa si fa col mezzo del *barometro*: prendiamo un tubo di vetro lungo da ottanta a novanta centimetri, aperto ad un estremo e chiuso all'altro; riempiamolo di mercurio, ed applicato il dito contro l'estremo aperto (fig. 103) capovolgiamo il tubo, ed introduciamo codesto estremo nel mercurio contenuto in una vaschetta, avendo cura di non ritirare il dito dall'apertura finchè questa non sia ben al di sotto della superficie del mercurio stesso.

Nella figura 104 si vede il tubo già capovolto che sorge diritto sul vaso: osserviamo ora che cosa accade.

Il mercurio entro la canna si tiene ad un'altezza in media di 76 cm. sul livello della vaschetta, se l'esperienza si fa a livello del mare. Lo spazio sopra il mercurio nella canna, se questa fu bene riempita di mercurio, è vuoto di aria, ed è detto *vuoto torricelliano* in onore di Evangelista Torricelli che

primo eseguì questa esperienza. Ora è chiaro che alla pressione idrostatica della colonna barometrica fa, ad ogni istante, equilibrio la pressione atmosferica, la quale si esercita liberamente sulla vaschetta,

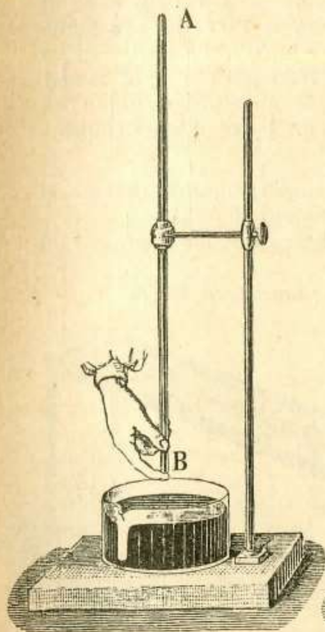


Fig. 103.

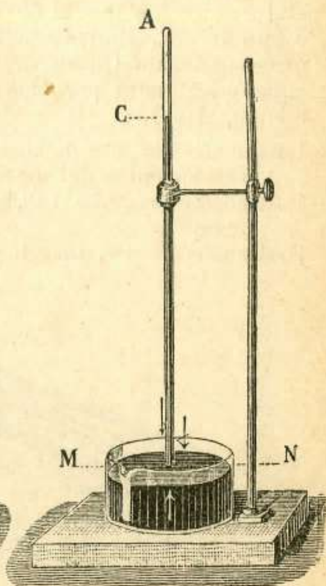


Fig. 104.

e si trasmette pel principio di Pascal anche di sotto in su: tale pressione, in conseguenza, è misurata, a livello del mare, da quella che esercita una colonna di mercurio dell'altezza di 76 centimetri.

Il ragionamento vale qualunque sia la forma e la sezione della canna, purchè non si tratti di un tubo capillare: cosicchè supponendo per semplicità che la canna sia cilindrica ed abbia la sezione di 1 cm^2, il peso della colonna di mercurio sarà di $76 \times 13^{gr},59 = 1033$ gr.; vale a dire, la pressione atmosferica, ne' luoghi dove la colonna barometrica è alta 76 cm., equivale a 1033 gr. per ogni centimetro quadrato. Questa pressione è presa come *normale,* ed è detta per brevità 1 *atmosfera.* Riassumendo, si avrà:

1 Atmosfera $= 76^{cm}$ di *mercurio;* oppure, essendo il peso specifico del mercurio 13.596,

1 Atmosfera $= 0^{m},76 \times 13,596 = 10^{m},333$ di *acqua;* od anche

1 Atmosfera $= 1^{kg},0333$ di *peso sopra* 1^{cm^2}.

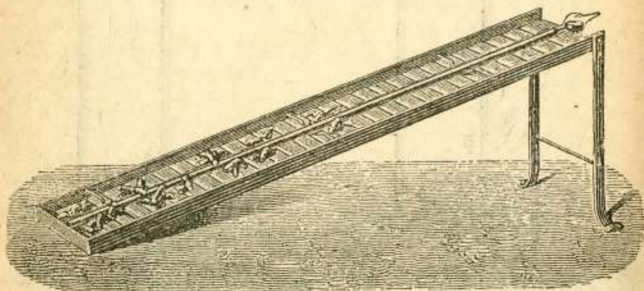


Fig. 105.

Affinchè il barometro dia indicazioni esatte, bisogna che sia riempito con mercurio puro, e non contenga traccie di vapore acqueo, nè di aria. A tal fine, lavata diligentemente la canna di vetro e fattala asciugare a una corrente d'aria calda, se

ne chiude alla lampada una estremità, e a quella aperta si salda un'ampolla di vetro; poi si riempie il tubo con mercurio perfettamente puro fino al collo dell'ampolla. Si posa allora il tubo sopra una graticola inclinata (fig. 105) circondandolo di carboni incandescenti, in modo da portarlo ad una temperatura vicina a quella dell'ebollizione del mercurio. Si aumenta allora il calore verso la parte inferiore della graticola così da far nascere l'ebollizione, e quando questa ha durato 4 o 5 minuti, si trasporta il carbone un po' più in alto, e si prosegue l'operazione finchè si sia fatto bollire il mercurio in tutta la lunghezza del tubo. Durante l'ebollizione i vapori di mercurio producono delle vibrazioni nel tubo, tendenti a rigettare il liquido fuori della canna; l'ampolla saldata all'estremità è destinata appunto a riceverlo.

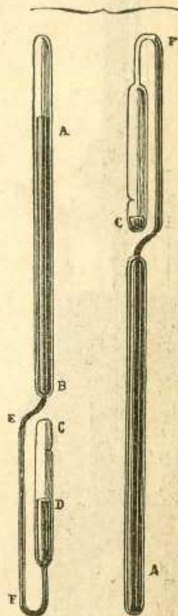


Fig. 106.

Dopo l'ebollizione, le bolle d'aria e l'umidità che aderivano al vetro sono scomparse, e il tubo presenta l'aspetto lucente di uno specchio ben terso. Da ultimo si stacca l'ampolla con un colpo di lima, e si termina di riempire completamente il tubo con mercurio puro e caldo.

Quando il barometro è ben riempito, inclinando dolcemente il tubo, si ode un colpo secco dato dal mercurio contro il vetro all'estremità chiusa; se vi

fosse rimasta dell'aria, il suono sarebbe ammortito.

Per misurare comodamente l'altezza della colonna barometrica, si dispone d'ordinario su una tavoletta, parallelamente alla canna verticale, una scala divisa in centimetri e millimetri: nelle letture si collima con la sommità del menisco. In questi casi si dà alla vaschetta una sezione relativamente grande, affinchè la quantità di mercurio che entra nella canna o ne esce, quando l'altezza della colonna varia, non alteri sensibilmente il livello del pozzetto a cui corrisponde lo zero delle divisioni.

Il barometro a sifone di Gay-Lussac (fig. 106) si riempie allo stesso modo, e di poi lo si piega alla lampada nella sua parte capillare.

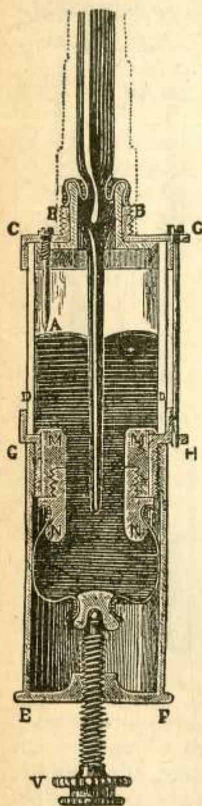


Fig. 107.

124. **Barometro Fortin.** — In altri barometri a mercurio, come in quello del Fortin, per fare che lo *zero* della scala si trovi sempre a livello della vaschetta, si rende mobile il fondo di questa; l'osservatore, prima di fare la lettura barometrica, ha cura di portare a zero il detto livello.

Descriviamo questo barometro che è molto usato: un cilindro di vetro *D D* munito di due ghiere metalliche, è tenuto a posto da tre tiranti come *C H* (fig. 107). La ghiera superiore che forma co-

perchio è foderata internamente di legno, ed ha una tubulatura centrale ove è assicurata la canna barometrica mercè pelle di camoscio; attraverso ai pori di questa si esercita la pressione atmosferica sul mercurio *A*, senza che esso possa uscire. La ghiera inferiore *GH* è munita di un anello di bosso *MM*, entro il quale ne è avvitato un altro *NN* che porta legata una borsa di pelle. Questa costituisce il fondo del pozzetto, e s'appoggia sul bottone della vite *V* che ha la madrevite nell'astuccio metallico *GEFH*. Sul coperchio *CG* v'ha, per lo più, un foro chiuso a vite; slentando la vite, la pressione atmosferica si esercita liberamente, meglio che attraverso ai pori della pelle di camoscio, sulla pozzetta di mercurio. Facendo girare la vite *V*, si conduce il mercurio a sfiorare la punta di avorio *A* che corrisponde allo zero della scala. Questa poi è tracciata lungo un astuccio d'ottone, che come una guaina protegge la canna barometrica: la guaina ha nella parte superiore due fenditure longitudinali opposte che lasciano vedere il menisco del mercurio in *Q* (fig. 108): la distanza di questo dalla punta d'avorio, letta sulla scala, è l'altezza barometrica.

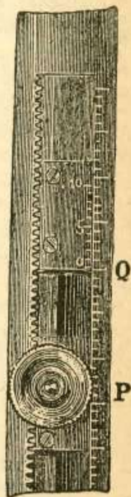


Fig. 108.

Nella figura si vede anche il *nonio* che consiste d'ordinario in una lunghezza di nove millimetri divisa in dieci parti, talchè una sua parte è $\frac{9}{10}$ di millim.; il nonio serve a valutare i decimi di millimetro. Condotto difatti col mezzo del rocchetto *P*, che ingrana coi denti della fenditura, lo zero del

nonio ad essere tangente al menisco, si leggerà sulla scala direttamente il numero dei millimetri che misura l'altezza della colonna barometrica; e la frazione di millimetro, se lo zero del nonio è compreso fra due divisioni, si avrà leggendo il numero del nonio che coincide con una delle divisioni della scala. Per mezzo di un anellino fisso alla parte superiore dell'astuccio, si appende questo barometro ad un gancio portato ordinariamente da una tavoletta; così si dispone da sè con la scala verticale: a fissarlo poi in detta posizione serve un anello fisso alla tavoletta e munito di tre viti, il quale abbraccia il fondo dell'astuccio metallico.

Per trasportare questo barometro, si slenta alquanto la piccola vite del coperchio per dare più facilmente sfogo all'aria, e si gira cautamente la vite *V* fino a tanto che tutta l'aria sia uscita e il mercurio riempia completamente la camera barometrica, della qual cosa ci si accorge dalla resistenza che si sente nel manovrare la vite; allora si può inclinare e capovolgere, senza tema d'inconvenienti.

125. **Usi del barometro.** — Il barometro è adoperato in molte ricerche. Ad esempio, possiamo col suo mezzo determinare l'altezza di un monte: sappiamo che la pressione d'un liquido va crescendo coll'aumentare della profondità sotto la superficie di livello; la stessa cosa deve verificarsi in questo oceano d'aria che involge la superficie terrestre, ossia la pressione deve diminuire dal basso verso l'alto.

Difatti salendo verso la sommità di un monte, avremo su di noi un peso d'aria ognor più piccolo di quello che avevamo stando in basso, e perciò la pressione dell'aria andrà diminuendo. Cosicchè l'aria in alto non sarà capace di equilibrare la

stessa colonna di mercurio che essa regge al basso, e il barometro discenderà mano a mano che più in alto saliremo sul monte: l'esperienza conferma perfettamente la previsione. Ora vediamo come dalla differenza di altezza della colonna barometrica alla base e alla sommità del monte, si possa dedurre l'altezza di questo.

Per intendere in qual modo ciò possa farsi, supponiamo, per un momento, l'atmosfera costituita da aria secca a 0°, con densità ovunque eguale a quella che ha a livello del mare. Noi sappiamo che tali condizioni non possono verificarsi, perchè l'aria è sempre un po' umida, la temperatura e la densità variano di continuo, e sono diverse secondo l'altezza; nondimeno facciamo qui tale supposizione per semplificare il nostro ragionamento. Nelle condizioni suddette l'aria avrebbe un peso specifico 10515 volte minore di quello del mercurio, e quindi bisognerebbe salire $10^m,515$, affinchè il mercurio del barometro si abbassasse di 1^{mm}. Sarebbe dunque cosa facilissima dedurre la differenza di livello di due luoghi dalla differenza delle rispettive indicazioni barometriche; ma in realtà la questione è molto più complicata per le ragioni accennate.

Il seguente prospetto, che è frutto di molte esperienze, ci dà il valore medio della diminuzione della pressione alle varie altezze, e ci permette di stimare l'altitudine di un luogo per mezzo della pressione barometrica.

Elevazione	Diminuzione dell'altezza barometrica
da 0 a 100 m.	m/m 9,5
» 100 » 200 »	» 9,4
» 200 » 300 »	» 9,3

Elevazione	Diminuzione dell'altezza barometrica
da 300 » 400 m.	m/m 9,2
» 400 » 500 »	» 9,0
» 500 » 600 »	» 8,9
» 600 » 700 »	» 8,7
» 700 » 800 »	» 8,6
» 800 » 900 »	» 8,5
» 900 » 1000 »	» 8,4
» 1000 » 1100 »	» 8,2
» 1100 » 1200 »	» 8,1
» 1200 » 1300 »	» 8,0
» 1300 » 1400 »	» 7,8
» 1400 » 1500 »	» 7,7
» 1500 » 1600 »	» 7,6
» 1600 » 1700 »	» 7,5
» 1700 » 1800 »	» 7,4
» 1800 » 1900 »	» 7,3
» 1900 » 2000 »	» 7,1

Così, ad esempio, se fra l'indicazione del barometro su un altipiano e quella letta nello stesso istante a livello del mare c'è una differenza di m/m 29,5, l'altitudine del luogo di osservazione ci sarà nota mediante il calcolo seguente:

Elevazione da 0 a 100 m.	m/m 9,5
» » 100 » 200 »	» 9,4
» » 200 » 300 »	» 9,3
	m/m 28,2

Per arrivare a $^m/_m$ 29,5 mancano ancora $^m/_m$ 1,3

i quali corrispondono ad una elevazione x minore di 100 metri, perchè nella successiva elevazione da 300 a 400 metri il barometro diminuisce di $^m/_m$ 9,2. Il numero x evidentemente si calcola colla proporzione:

$$9{,}2 : 100 = 1{,}3 : x;$$

da cui:

$$x = 15.$$

Dunque l'altipiano trovasi a 315 metri sul livello del mare.

Il barometro è pure adoperato per fare qualche pronostico sull'andamento del tempo, osservando le variazioni della sua altezza. Quando il barometro si abbassa rapidamente, possiamo aspettarci un tempo cattivo; laddove, se il mercurio oscilla poco e si mantiene alto, possiamo attenderci la continuazione del bel tempo. Ma il buono o cattivo tempo, oltre che dalla pressione, dipende da molte altre circostanze, cosicchè la sola indicazione del barometro non è un indizio certo.

Inoltre il barometro, anche quando il tempo è stabile, offre alcune piccole oscillazioni giornaliere: esso si abbassa di qualche millimetro (uno o due) da alcune ore dopo la levata del sole sino a qualche ora innanzi al tramonto; per elevarsi poi nella sera e nel mattino di quasi altrettanto.

126. **Previsione del tempo.** — La sola osservazione barometrica in un dato luogo non basta, come si è detto, a fare qualche probabile pronostico sul tempo buono o cattivo che sarà fra uno o due giorni, cioè a breve scadenza; ma occorre all'uopo conoscere il valore, a una data ora, della pressione atmosferica ridotta al mare in parecchi

luoghi di estese contrade. A tale intento i vari Stati hanno fondato degli osservatorii meteorici che fanno osservazioni regolari, in date ore del giorno, non

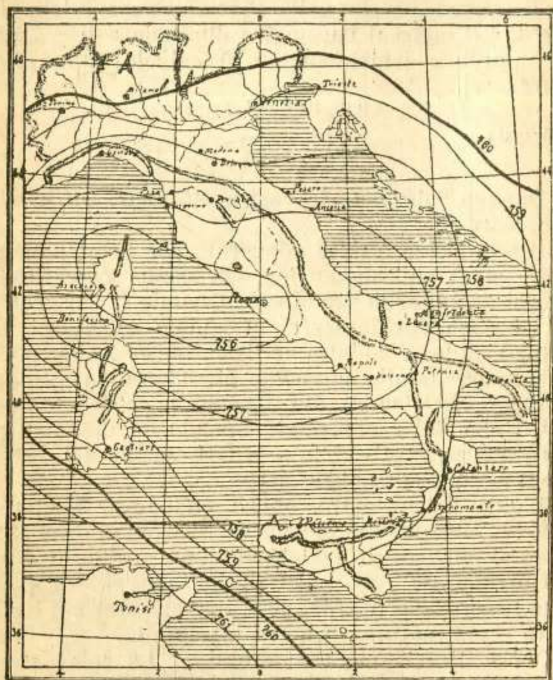


Fig. 109.

solo della pressione atmosferica, ma ancora della temperatura e dell'umidità dell'aria, della direzione e forza del vento, ecc.

Per il servizio della previsione del tempo, a breve scadenza, i varii Osservatorii di uno Stato corrispondono telegraficamente con l'Ufficio meteorologico centrale; da noi codesto Ufficio è a Roma: gli Uffici centrali poi dei diversi Stati comunicano fra di loro.

Le letture barometriche sono fatte alle ore 8 del mattino; queste letture, opportunamente corrette, vengono segnate su una carta geografica ne' luoghi donde provengono. Si congiungono poi con linee le stazioni dove la pressione ha lo stesso valore, e si ottengono così le *linee isobariche*. La fig. 109 mostra, per esempio, uno di tali tracciati che riguarda l'Italia. Ora è evidente che l'aria debba spostarsi dai luoghi di maggior pressione verso quelli di pressione più bassa, come, del resto, l'esperienza sempre conferma; il vento soffierà quindi diretto dai primi verso i secondi, e sarà tanto più gagliardo quanto maggiore sarà il gradiente, ossia la differenza di pressione tra due luoghi alla unità di distanza. E però dalla carta delle isobariche si dedurrà facilmente la direzione e la forza del vento nelle diverse regioni.

Supponiamo ora che in una stazione A (fig. 110) si abbia una pressione minore che in tutti i luoghi circostanti C_1, C_2, $C_3, \ldots$; si dice allora che in A esiste un minimo di pressione, ovvero anche un *ciclone*. In tal caso il vento convergerà in A da tutte le direzioni, e queste correnti d'aria prossime alla superficie terrestre saranno cariche di umidità, specialmente se calde e abbiano percorso grandi estensioni di acqua. In A dovrà necessariamente formarsi una colonna di aria ascendente per dar posto all'aria che arriva da ogni parte; il vapor d'acqua, salendo, si condenserà pel raffreddamento che vi prova, onde la formazione di nubi e la *probabilità* di pioggia.

Se invece in A si ha una pressione maggiore che in tutti i luoghi circostanti, si dice che in A è un *anticiclone;* allora l'aria si sposterà da A in tutte le direzioni, nel mentre altra aria fredda e secca scenderà dall'alto a colmare il vuoto: la probabilità quindi è che in A il cielo sia sereno e faccia bel tempo.

Vediamo dunque che in un dato luogo una bassa pressione è indizio di pioggia, e un'alta pressione, al contrario, di bel tempo; ma per dedurne una

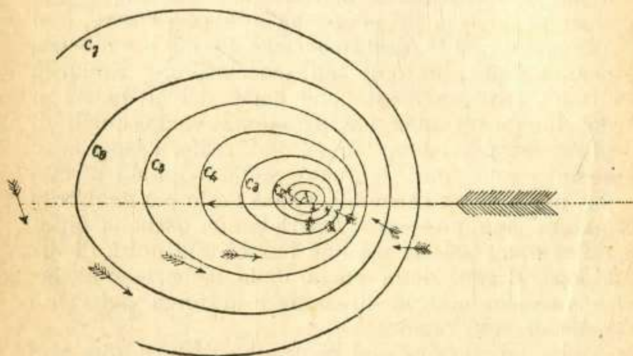


Fig. 110.

previsione probabile, occore l'osservazione contemporanea del barometro in tutta una vasta regione.

E non vogliamo tralasciare di dire che l'osservazione ha ormai dimostrato che il buono o cattivo tempo nelle nostre regioni dipende principalmente dal movimento dei cicloni che si formano sulla corrente del Gulf-stream, e si dirigono costantemente, con grande velocità, sulle coste occidentali dell'Europa attraversandole da Ovest verso Est, ora più a Nord ora più a Sud.

127. **Riduzione a 0° dell'altezza barometrica.** — Se si vuole avere il valore esatto della pressione atmosferica, bisogna ridurre a zero la temperatura del mercurio, esprimere cioè in ogni caso la detta pressione con l'altezza di una colonna di mercurio di determinata densità; e bisogna anche correggere l'influenza della dilatazione della scala, le cui divisioni sono esatte solamente a 0°.

Entrambe queste correzioni sono contenute nella seguente formola:

$$b' = b - 0{,}000\,161\,24\, b\, t$$

ove b è l'altezza barometrica osservata, b' quella corretta e t la temperatura centigrada.

128. **Barometri metallici.** — Sono oggi generalmente diffusi dei barometri metallici, i quali, se non per l'esattezza, sono certo preferibili per la comodità, specialmente quando si hanno da usare in viaggio.

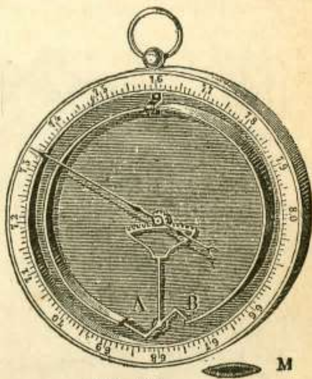


Fig. 111.

L'*aneroide* (fig. 111) consiste in un tubo di ottone a pareti sottilissime, di sezione lenticolare, privo d'aria e piegato ad arco. Quando la pressione varia, la superficie esterna dell'arco essendo più estesa dell'interna, ne risente maggiormente l'influenza: se la pressione aumenta i due estremi dell'arco si avvicinano, si allontanano invece se essa diminuisce. Siffatti piccoli spostamenti, col mezzo di leve ben congegnate, vengono amplificati da un lungo indice

che segna la pressione dinanzi ad una graduazione: naturalmente questa viene effettuata confrontando le indicazioni del barometro aneroide con quelle del barometro a mercurio; ma poichè col tempo si altera la elasticità del metallo, è necessario di quando in quando rivedere la graduazione.

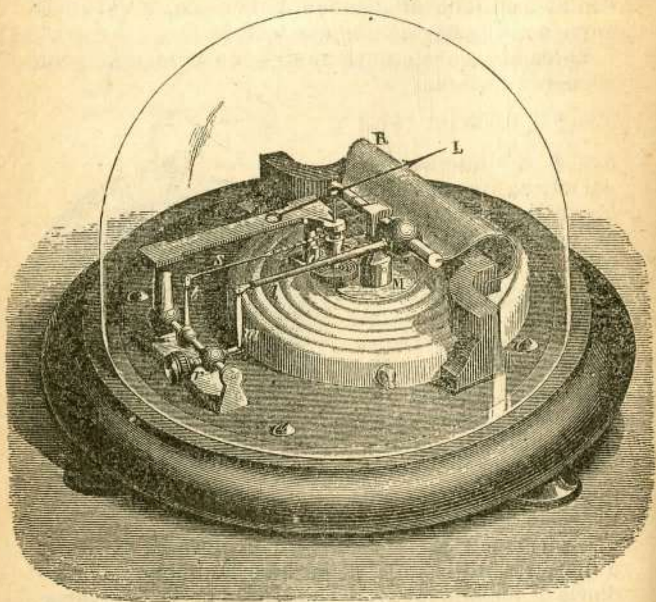


Fig. 112.

L'*olosterico* consiste invece in una scatola d'ottone ermeticamente chiusa e vuota d'aria; essa ha un coperchio sottile, reso flessibilissimo da scanalature circolari, cosicchè risente le menome variazioni di

pressione. Con un giuoco di leve un po' complicato (fig. 112) i piccolissimi spostamenti del coperchio vengono amplificati da un indice. La graduazione si fa come quella dell'aneroide: per regolare l'istrumento si gira una vite che non si vede nella figura perchè situata a tergo, e si porta la lancetta a indicare sul quadrante la pressione segnata in un dato istante da un barometro a mercurio.

Sovrapponendo più scatole aventi ambo le basi flessibili e rese solidali col mezzo di colonnette *M*, si può accrescere la sensibilità dell'istrumento come

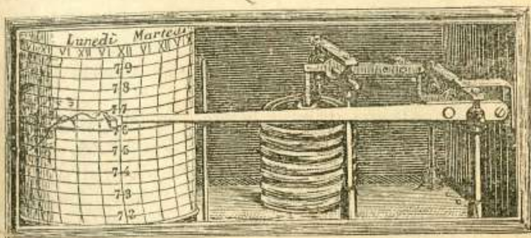


Fig. 113.

succede nel *barometro-registratore* del Richard (figura 113). In questo il moto dell'ultima colonnetta è trasmesso, per mezzo di un sistema di leve amplificatrici, a una penna, la quale traccia una linea che indica la pressione su un tamburo, cui un apparecchio di orologeria, posto nel suo internò, fa compiere un giro in una settimana.

Tale barometro è molto utile perchè, in un dato luogo, fa vedere l'andamento della pressione atmosferica ad ogni istante.

129. **Legge di Boyle-Mariotte.** — Abbiamo descritte alcune semplici esperienze che dimostrano

la facilità dei gas a variare di volume quando variano la pressione e la temperatura. Basti ricordare l'esperienza della vescica sotto la campana della macchina pneumatica, e l'aria che si dilata con il riscaldamento nel palloncino della fig. 7.

Pertanto il volume di una massa gasosa dipende dalla pressione che sopporta e dalla temperatura; e quando questa resta costante, il volume non dipende più che dalla pressione. La legge che regola il fenomeno è molto semplice: *il volume di una data massa di gas, a temperatura costante, è in ragione inversa della pressione.* Essa venne prima enunciata da Boyle e poi verificata da Mariotte: è fondamentale per la teoria dei gas, e la si chiama da alcuni legge di Boyle, da altri legge di Mariotte.

Per dimostrare questa legge con l'esperienza, nel caso di pressioni maggiori dell'atmosfera, si adopera d'ordinario un lungo tubo di vetro aperto all'estremità superiore, e ricurvo verso l'estremità chiusa a guisa di un sifone rovesciato (fig. 114).

Il tubo chiuso è diviso, a partire da un punto, in parti di eguale capacità; se il tubo è cilindrico, come si procura che sia, divisioni di eguale lunghezza corrispondono a capacità eguali. Lungo il ramo aperto e verticale è tracciata una scala metrica; lo zero di questa coincide con lo zero delle divisioni del tubo chiuso. Si comincia con l'introdurre un pò' di mercurio nella parte curva, e si riesce facilmente, inclinando l'apparecchio opportunamente a destra o a sinistra, a rinchiudervi tanta aria, che il livello del mercurio sia zero nei due rami (fig. 114). Così dunque l'aria contenuta nel ramo chiuso, alla temperatura dell'ambiente, occupa un volume conosciuto, ed esercita una pressione eguale a quella della libera atmosfera, misurata dalla colonna

barometrica. Se allora si fa diminuire il volume concesso all'aria aumentando la pressione col versare

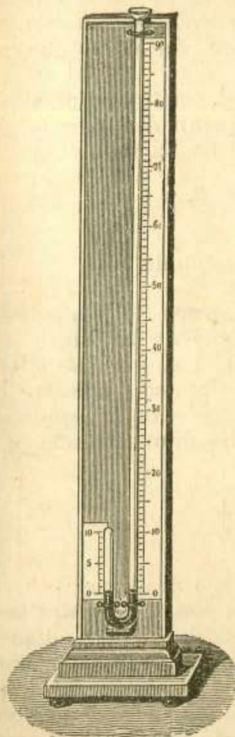


Fig. 114.

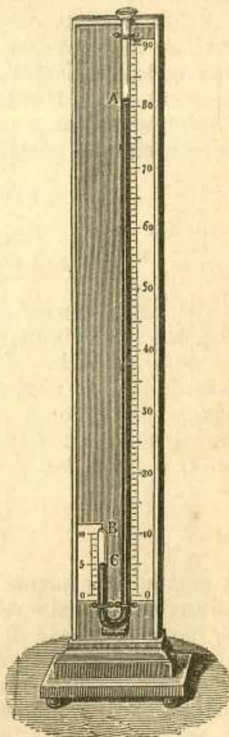


Fig. 115.

nuovo mercurio nel ramo aperto, e volta per volta si misura il nuovo volume assunto dall'aria, e si

nota la pressione corrispondente che è quella del barometro aumentata della colonna di mercurio sopra il livello C (fig. 115), si trova che il prodotto del volume per la corrispondente pressione è costante, se la temperatura non varia; ciò che conferma la legge suddetta.

Dicendo v e v' i volumi di una data massa di gas, alle pressioni corrispondenti B e B', se la temperatura rimane costante, si ha dunque:

$$v : v' = B' : B,$$

od anche:

$$B\,v = B'\,v' = \text{costante}.$$

E poichè la densità di un corpo è in ragione inversa del suo volume, così può anche dirsi che, *a temperatura costante, la densità di una determinata massa di gas è in ragione diretta della pressione che subisce, o della forza elastica che le fa equilibrio:* ossia dicendo d e d' le densità di un gas alle pressioni B e B', si ha:

$$\frac{d}{d'} = \frac{B}{B'}$$

che parimenti esprime la legge di Boyle.

Le densità considerate qui sono le *densità assolute*, ossia le masse dell'unità di volume, od anche le densità relative a un corpo tipico in determinate condizioni di temperatura e di pressione, e non le densità relative all'aria; queste, come è evidente, non variano, perchè la densità assoluta del gas e quella dell'aria variano in proporzione per la legge di Boyle, nei limiti in cui questa si verifica.

Per le pressioni inferiori a un'atmosfera, si adopera una pozzetta profonda in parte piena di mer-

curio (fig. 116), nella quale si immerge una canna barometrica ben cilindrica e graduata in parti eguali, contenente dell'aria nella parte superiore. Immergendo di più o di meno la canna nel pozzetto, si fa variare il volume dell'aria ivi rinchiusa; la sua pressione è data dalla differenza dell'altezza barometrica e di quella del mercurio nella canna.



Fig. 116.

Ora si può domandare: gli altri aeriformi si comportano come l'aria o in modo diverso? Molti fisici si occuparono della questione, adoperando per le loro esperienze apparecchi molto più precisi di quelli rudimentali da noi descritti; e la conclusione è stata questa, che alcuni, come l'anidride carbonica, l'ammoniaca, si comprimono un po' più dell'aria; l'idrogeno invece si comprime meno. Ma se si esperimenta ad una temperatura e ad una pressione tali che l'aeriforme sia ben lontano dal punto di liquefazione, le differenze sono molto piccole, e si può in tal caso ritenere,

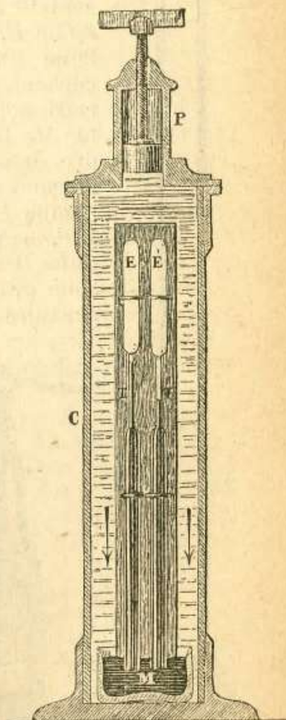


Fig. 117.

senza errore sensibile, che ogni gas si comporti come l'aria.

Per mettere in evidenza che l'anidride carbonica, per esempio, si comprime più dell'aria atmosferica, si può ricorrere all'apparato di Despretz rappresentato dalla fig. 117. Due provette graduate E, E' di egual diametro, empita l'una d'aria secca, l'altra d'anidride carbonica, hanno le loro aperture inferiori sotto il mercurio della vaschetta M. Il tutto è compreso in un cilindro di vetro C a pareti spesse pieno d'acqua e sormontato da un corpo di pompa P, nel quale, col mezzo di una vite, si può far discendere uno stantuffo. Il volume e la pressione iniziali sono gli stessi pei due gas, e la temperatura non può variare in grazia della grande massa d'acqua che li circonda. Esercitando su questa una pressione mediante lo stantuffo P, il mercurio sale nelle due canne, ma inegualmente: l'anidride carbonica si comprime più dell'aria. A partire da due atmosfere la differenza è di già sensibile. — L'acido solfidrico, il cia-



Fig. 118.

nogeno, l'ammoniaca, e in generale i gas facili a liquefarsi, si comportano come l'anidride carbonica, si comprimono cioè più dell'aria, al contrario di quello che succede per l'idrogeno.

Regnault, tra gli altri, con apparecchi di grande perfezione (fig. 118), istituì una lunga serie di accurate esperienze, dalle quali risulta che, a tutto rigore, nessun gas obbedisce esattamente alla legge di Boyle: il prodotto $v B$ del volume per la pressione, *quando questa non superi circa 30 atmosfere*, va diminuendo per tutti i gas, eccetto l'idrogeno pel quale aumenta. Le differenze sono più notevoli per quei gas che sono più facili a liquefarsi; meno sensibili invece per l'aria, l'ossigeno, l'azoto, l'idrogeno e l'ossido di carbonio, i quali, fino agli ultimi tempi, erano considerati come gas che permanevano nello stato gasoso, ossia non coercibili, perchè sebbene assoggettati a enormi pressioni non si erano liquefatti. Fu nel corso di tali esperimênti che Natterer, comprimendo questi ultimi gas sino a 3000 e più atmosfere colla speranza di liquefarli, osservò il fatto nuovo che a quelle enormi pressioni questi aeriformi si comprimevano meno di quanto comportasse la legge di Boyle; ossia il prodotto $v B$ suddetto aumentava. Cailletet ed Amagat, più tardi, conciliarono tali risultati mostrando che per varii gas, eccetto l'idrogeno, vi è un valor minimo del prodotto $v B$ che si verifica ad una certa pressione, oltre la quale il prodotto prende poi ad aumentare come per l'idrogeno. A ogni modo, se si ha un gas lontano dal punto di liquefazione e non soggetto a fortissime pressioni, si può sempre, con grande approssimazione, applicare la legge di Boyle.

130. **Spinta dell'aria; aerostati.** — Ora, giacchè l'aria è un fluido pesante ed elastico, i corpi che

stanno in essa risentiranno una spinta come succede nell'acqua, benchè d'assai minore; in altre parole, sarà applicabile ai gas il principio di Archimede. Ciò si verifica col *baroscopio:* questo è una piccola bilancia dove, in luogo dei piattelli, una

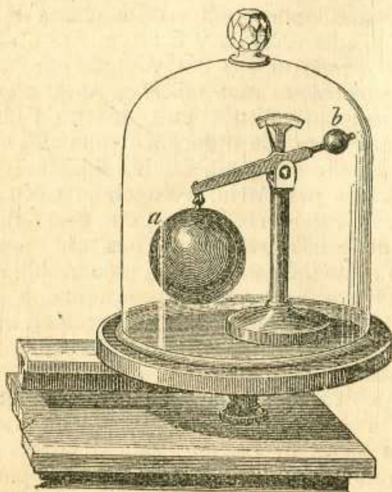


Fig. 119.

palla piccola e massiccia fa equilibrio ad una sfera grande e vuota ermeticamente chiusa (fig. 119).

Collocato il baroscopio sotto una campana dalla quale si estragga l'aria, il giogo s'inclina mostrando che la grossa sfera pesa in realtà più della piccola, e che nell'aria l'equilibrio sussisteva perchè quella, spostando una maggior quantità di aria, risentiva una spinta maggiore.

Un corpo immerso nell'aria, invece di cadere, s'innalzerà dunque ogni qualvolta la spinta superi il suo peso. I solidi e i liquidi, essendo più densi dell'aria, cadono tutti in seno all'atmosfera; ma un involucro di seta spalmato con una vernice di gomma elastica che lo rende pochissimo permeabile agli aeriformi, riempiuto di gas illuminante, o meglio ancora di idrogeno, risultando più leggiero dell'aria sotto un egual volume, salirà sino ad uno strato d'aria dove risentirà una spinta pari al proprio peso. Un involucro così fatto è, come si sa, un *pallone aerostatico*, e può essere sufficientemente grande da reggere una navicella contenente più di una persona.

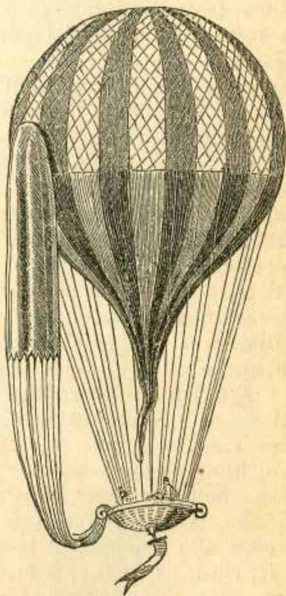


Fig. 120.

I primi palloni volanti avevano l'involucro di carta, e furono detti *mongolfiere* dal nome dei fratelli Mongolfier che per i primi fecero l'esperienza. Nella fig. 120 si vede invece uno di questi palloni formato da tanti fusi sferici di seta gommata, come si è detto: in cima v'ha una valvola, che col mezzo di una funicella si può aprire per far sfuggire il gas interno e diminuire la spinta. In fondo v'è un'altra

apertura dalla quale, a mano a mano che il pallone si eleva sottraendosi in parte alla pressione esterna, il gas esce; altrimenti l'eccesso della sua forza elastica potrebbe far scoppiare l'involucro.

La forza che spinge in su l'aerostato è detta *forza ascensionale:* essa è data dalla differenza fra la spinta e il peso del pallone, il quale risulta dal peso del gas che lo riempie, da quello dell'involucro, della navicella, dell'aeronauta, ecc.

Tutto il pallone, come si vede, è abbracciato da una rete di corde di seta che regge la navicella. Quando l'aeronauta vuol discendere, apre la valvola superiore, e allora il pallone diventa più pesante; quando invece vuol salire, getta de' sacchetti di sabbia che come zavorra ha avuto cura di prendere con sè. In caso di disgrazia agguanta i fili del paracadute che si vede pure rappresentato nella figura; questo aprendosi come un ombrello, rallenta, con la grande resistenza che incontra nell'aria, la velocità della caduta.

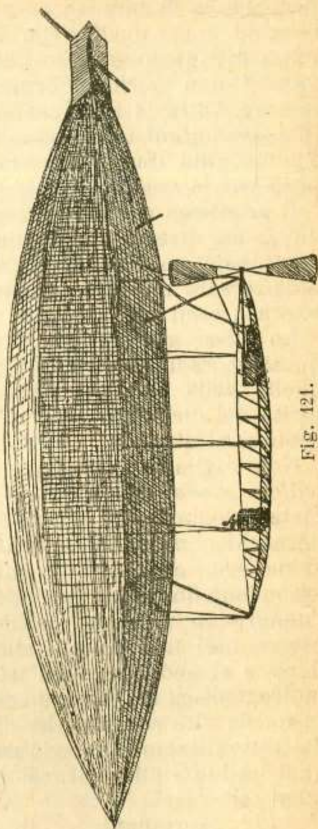
131. **Dirigibilità degli aerostati.** — È una questione di grande attualità, e il problema si può dire risoluto; ma, purtroppo, i palloni dirigibili non hanno finora servito che come mezzi di distruzione nella immane, terribile guerra che affligge il mondo. Auguriamoci che possano presto servire invece alla scienza, al benessere umano.

I primi esperimenti al riguardo, cominciati con una certa timidezza, si succedettero sempre più numerosi, pieni di ardimento e di fede nel successo. Tra i più importanti ricorderemo quelli dei capitani Renard e Crebs in Francia, i primi veramente interessanti in ordine storico (an. 1884); quelli più recenti dello Zeppelin in Germania; e quelli del Genio Militare e del Forlanini in Italia.

Gli studi furono in generale diretti a stabilire,

fra le altre cose, la resistenza opposta dall'aria al moto dell'aerostato; la forma più adatta affinchè tale resistenza risultasse la minore possibile; le condizioni per la più sicura stabilità, ecc., ecc.

Quanto alla forma da dare all'aerostato, le esperienze sono concordi in quella di un uovo allungato, (fig. 121) cosicchè siffatti aerostati rassomigliano a enormi sigari avana, aventi d'ordinario la capacità da 2000 a 3000 m³.


Fig. 121.

Ma la questione essenziale era quella del motore: occorre difatti un motore potente e nello stesso tempo leggiero, di sicuro funzionamento, che col mezzo di un'elica sia capace d'imprimere alla massa dell'aerostato una velocità da 50 a 80 km. all'ora; tale, in ogni caso, da vincere almeno la forza di venti moderati. Motori abbastanza leggieri, del peso di circa 5 kg.

per cavallo motore, ve ne sono già; sono motori a benzina come quelli delle automobili; ma la sicurezza del funzionamento non è assoluta, come provano i non pochi infortuni dovuti più spesso al motore. Tuttavia i progressi compiuti al riguardo in questi ultimi tempi sono tali da far ritenere che l'uomo, alla fine, è riuscito vittorioso nell'audace lotta per la conquista dell'aria.

Il problema di muoversi con l'areostato in una direzione diversa da quella della corrente aerea dominante nell'atmosfera, è analogo a quello di attraversare un corso d'acqua a nuoto, o con una barca a remi che abbiamo trattato al § 35.

Lo stesso succede con i dirigibili: affinchè poi questi possano avanzare in direzione opposta a quella della corrente aerea, è evidente che la velocità del dirigibile deve superare quella della corrente medesima.

Non vogliamo tralasciare di fare un cenno dei *palloni-sonda,* che prestano segnalati servigi alla meteorologia. Sono piccoli aerostati, forniti di apparecchi *registratori* della temperatura, della pressione, ecc.; essi sono lasciati liberi, e non di rado ascendono fino all'altezza di 12 o 15 mila metri, dove l'uomo non potrebbe assolutamente vivere. Dopo essere stati trasportati dalle correnti d'aria, ricadono, e si può così dagli istrumenti avere preziose indicazioni su l'andamento delle grandezze suddette in quelle alte regioni, che altrimenti rimarrebbero del tutto inesplorate; e ciò nella speranza di portare qualche lume alla spiegazione de' complessi fenomeni meteorici.

132. **Aeroplani.** — In questi ultimi anni la conquista dell'aria è stata tentata partendo anche da un principio ben diverso; quello cioè per il quale un aquilone si innalza da sè nell'atmosfera,

quando si trascini velocemente mediante una funicella.

Un aeroplano nelle sue linee essenziali è costituito (fig. 122) da una superficie AB quasi piana *(la superficie sostentatrice)*, di poco inclinata sul piano dell'orizzonte, la quale viene spinta mediante un apparecchio propulsore.

Per effetto della sua grande velocità, lo strato di aria $ABCD$ in immediato contatto con la parte anteriore della superficie sostentatrice, si comprime; conseguentemente esso tende a dilatarsi in

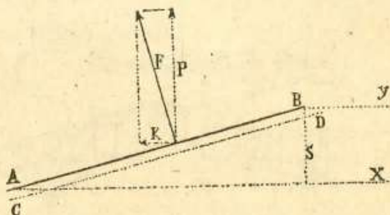


Fig. 122.

tutti i sensi, e da un canto sfugge al di sopra e al di sotto per i bordi A e B della superficie sostentatrice, d'altro canto esercita contro la superficie AB una forza F, che obbedisce non esattamente ma con molta approssimazione alle seguenti leggi:

1° È perpendicolare alla superficie AB, e ciò concorda con le forze analoghe già da noi studiate a proposito del principio di Pascal.

2° È proporzionale al quadrato della velocità dell'aeroplano.

3° È proporzionale alla sezione normale S del cilindro orizzontale $AXBY$ generato, nel suo moto di traslazione, dalla superficie sostentatrice.

Scomponiamo la forza F in due: una K orizzontale e l'altra P verticale.

La prima *(forza ritardatrice)* si oppone all'avanzamento, e la seconda *(forza sostentatrice)* tende a sollevare l'aeroplano; il che avviene quando la velocità di traslazione del medesimo ha raggiunto un certo valore limite.

Si ha interesse che il viaggio dell'aeroplano si compia col minimo spreco di combustibile nell'apparecchio propulsore; a tal uopo è necessario che la forza ritardatrice K, che è quella che deve essere vinta dal motore, sia molto piccola in con-

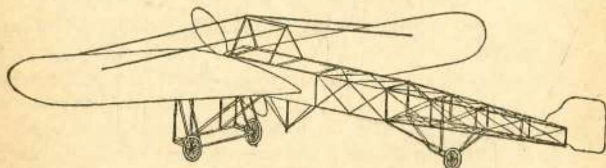


Fig. 123.

fronto di P, ed affinchè ciò avvenga, come si vede nella fig. 122, la superficie sostentatrice $A\,B$ deve esser quasi orizzontale. È questo il così detto *principio delle piccole inclinazioni* seguito nella costruzione pratica degli aeroplani (fig. 123).

Ad ogni modo anche qui, come nel caso dei dirigibili, il problema sopratutto era ridotto a trovare un motore potente e leggero. Il motore a scoppio ha precisamente i requisiti richiesti.

133. **Macchina pneumatica.** — Abbiamo descritto varie esperienze nelle quali si doveva estrarre l'aria da una campana, da un pallone, mercè la macchina pneumatica: è ora il momento di vedere

come essa agisca, e aiutiamoci con la figura schematica 124.

Una campana *V* contenente aria, è applicata con buon contatto su di un piatto; dal mezzo di questo scende un tubo, il quale aprendosi da una parte verso la campana e dall'altra verso un ci-

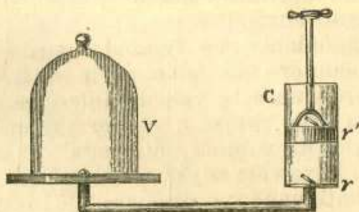


Fig. 124.

lindro o corpo di tromba *C*, stabilisce la comunicazione fra di loro. Uno stantuffo od embolo può muoversi entro il cilindro con perfetta tenuta d'aria, ed infine due valvole *r* ed *r'* chiudono due aperture, l'una nel fondo del cilindro, l'altra nel corpo stesso dello stantuffo: ambedue queste valvole si aprono verso l'alto e non all'ingiù. La fig. 125 ne mostra una ingrandita.



Fig. 125.

Supponiamo che da principio lo stantuffo sia nel fondo del cilindro, che le valvole sian chiuse, e che s'incominci a inalzare lo stantuffo stesso. Questo nel salire lascia dietro a sè un vuoto, che l'aria od altro gas tenterà di riempire appena possa entrarvi. L'aria esterna tende a spingersi in questo spazio; ma non può entrarvi senza premere con-

tro la valvola superiore, la quale perciò si chiude più fortemente, non potendo essa muoversi all'ingiù. Invece l'aria della campana può facilmente entrarvi, poichè essa movendosi lungo il tubo, e premendo colla propria tensione su la valvola inferiore *r*, la spinge all'insù, nel qual senso appunto questa può aprirsi; e quindi l'aria entrerà nello spazio vuoto anzidetto.

Ora supponiamo che l'embolo portato sino alla cima del cilindro sia spinto all'ingiù. L'aria sottoposta è premuta e la valvola inferiore si chiude: ma questa aria chiusa e compressa nel cilindro, diminuendo di volume, aumenta di tensione, e agendo su la valvola superiore *r'* la forza ad aprirsi. E così, continuando a premere all'ingiù lo stantuffo, tutta l'aria che stava nel cilindro viene spinta fuori attraverso la valvola stessa. Ora quest'aria che esce è parte di quella che dianzi stava nella campana; cosicchè, col primo movimento doppio di salita e di discesa dell'embolo, si ottiene di estrarre un po' d'aria dalla campana.

Ripetendo poi il medesimo processo, cioè alzando di nuovo lo stantuffo, l'aria esterna tiene chiusa la valvola superiore, mentre l'aria interna, per la via del tubo, giungerà ad aprire la valvola inferiore e a riempire lo spazio vuoto che si è formato sotto allo stantuffo. E quando questo discende, di nuovo la valvola inferiore si chiude, e la superiore si apre per lasciare sfuggire l'aria passata nel cilindro. Cosicchè, ad ogni doppio movimento, si estrarrà altra aria dalla campana.

È evidente che, per riescire in questo lavoro, è necessario che lo stantuffo chiuda bene, e che le valvole lavorino a dovere.

Siccome poi lo stantuffo non combacia perfettamente con la base del cilindro, rimane fra essi uno

spazio nocivo; difatti il limite della rarefazione è raggiunto quando l'aria di detto spazio, sebbene compressa, non acquista la tensione sufficiente a sollevare la valvola dello stantuffo.

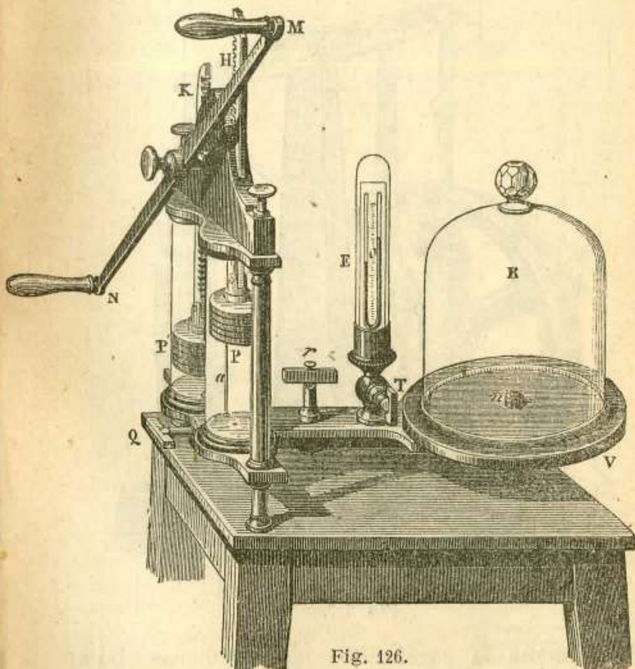


Fig. 126.

La figura 126 rappresenta una macchina pneumatica con due corpi di tromba, gli stantuffi dei quali sono collegati fra loro per mezzo di un rocchetto e di due aste dentate: in *E* si vede il provino o ma-

nometro (§ 136), che permette di giudicare del grado di rarefazione.

Nella macchina pneumatica, il lavoro che si fa nell'inalzare lo stantuffo cresce mano a mano

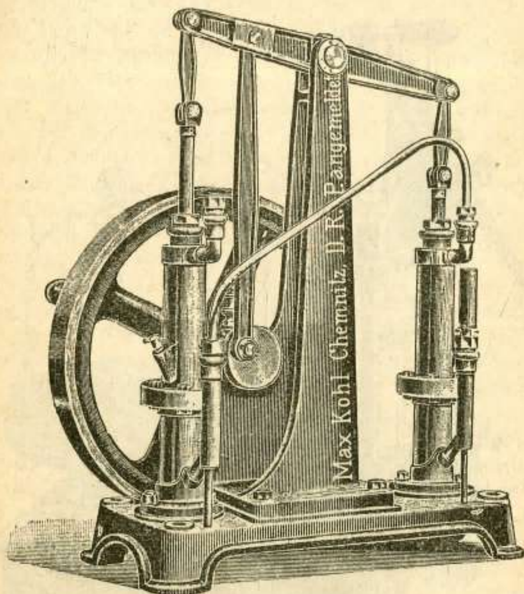


Fig. 127.

che aumenta la rarefazione nel recipiente che si vuol vuotare: difatti, in principio non si deve vincere che il peso dello stantuffo; invece, alla fine, bisogna vincere il peso di questo e la pressione dell'aria atmosferica che si esercita sulla base superiore, equivalente a 1 kg. circa per ogni cm.^{2}

Non vogliamo passare sotto silenzio la *pompa Geryk*, che è la migliore macchina pneumatica a stantuffo: ve ne sono a un cilindro, e a due come è la fig. 127. Con la prima si può rarefare l'aria sino alla pressione di $\frac{1}{2}$ mm., e con la seconda fino a circa 0,0002 mm. Tutte le giunture sono a perfetta tenuta, e non vi è spazio nocivo: gli stantuffi lavorano in un olio speciale; non si deve lasciar entrare acqua o vapore acqueo, onde tra il recipiente da vuotare e la pompa bisogna inserire una sostanza avida di umidità, come è l'anidride fosforica.

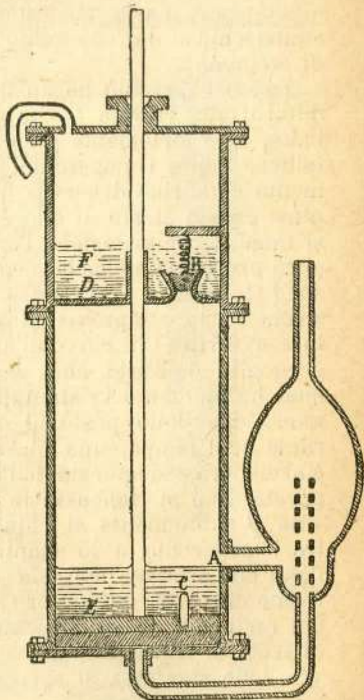


Fig. 128.

Una di queste pompe, a un sol corpo di tromba, è rappresentata schematicamente dalla figura 128. L'aria proveniente dal recipiente in cui si deve fare il vuoto, penetra nel corpo di tromba dall'orifizio laterale *A*: lo stantuffo, nella posizione di riposo, sta più in basso ed è coperto da un grosso strato

di olio *E*. Sollevando lo stantuffo, l'olio che raggiunge subito il livello dell'orifizio *A* impedisce il ritorno dell'aria nel recipiente che si vuol vuotare, e comprime l'aria medesima nello spazio sovrastante chiuso dal coperchio superiore *D* del corpo di tromba.

Questo coperchio ha un'apertura conica provveduta di una valvola *B* che si apre dal basso verso l'alto, ed è fortemente premuta da una spirale metallica. Sopra il coperchio poi, entro il prolungamento cilindrico del corpo di tromba, si trova un altro grosso strato di olio *F*. Quando lo stantuffo si innalza comprimendo l'aria sotto il coperchio, poco prima di combaciare con il coperchio, un punzone *C* di cui è provveduto apre la valvola *B*, cosicchè l'aria compressa sfugge per essa. L'operatore avvertito di ciò dall'urto del punzone e dal gorgoglio dell'aria che esce, mantiene fisso per qualche momento lo stantuffo in tale posizione, in modo che l'olio posto al disotto di *D* faccia, durante quel tempo, una massa unica con l'olio che è al disopra e si spurghi dell'aria che vi si era incorporata. Indi si riabbassa lo stantuffo: allora la valvola *B* subitamente si chiude, e si forma il vuoto tra il coperchio e lo stantuffo, finchè questo con l'olio che sostiene non sia disceso al disotto del livello di *A*; per questo foro allora nuova aria passa dal recipiente in cui si pratica il vuoto al corpo di tromba. Ripetendo più volte la descritta manovra dello stantuffo, si arriva a praticare un buon vuoto nel recipiente.

Per impedire poi che, al principio della manovra, si formi il vuoto al disotto dello stantuffo, con che crescerebbe il lavoro di sollevamento, la pompa è munita di un tubo laterale, di cui la figura mostra a evidenza l'effetto.

134. **Pompa di compressione.** — Quando si voglia comprimere, anziché rarefare l'aria in un vaso chiuso, si ricorre a una *pompa di compressione:* una delle più semplici è rappresentata dalla fig. 129.

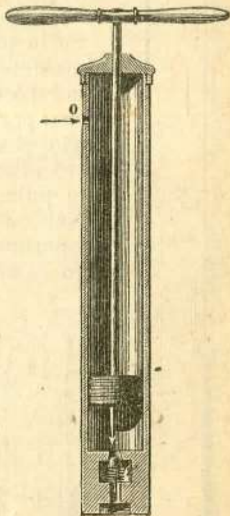
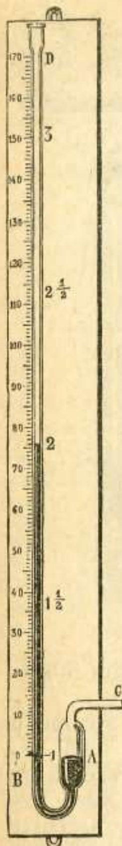


Fig. 129.

Essa si avvita sul recipiente nel quale si vuol comprimere l'aria, e se ne comprende facilmente il modo di funzionare: quando lo stantuffo è in alto, l'aria penetra nel corpo di tromba pel foro *O*; quando esso discende, l'aeriforme che non può sfuggire per *O* è compresso, e con la sua forza elastica apre la valvola di fondo, vincendo la contropressione dell' aria chiusa nel recipiente. È evidente poi che la valvola sta chiusa quando lo stantuffo risale, e che a ogni sua discesa una nuova ed uguale quantità d'aria viene compressa nel recipiente.

135. **Manometri.** — I *manometri* sono strumenti che servono a misurare la forza elastica degli aeriformi. Lo strumento della fig. 130 rappresenta un *manometro ad aria libera;* si applica al vaso ove è chiuso l'aeriforme, e col dislivello del mercurio che contiene serve a misurare la *pressione effettiva del gas*, la differenza cioè fra la pressione del gas e quella atmosferica. Quando si tratta di piccole pressioni effettive, come è, per esempio, quella eser-



citata dal gas di illuminazione che è misurata da una trentina di millimetri d'acqua, si adopera questo liquido in un tubo come quello della fig. 131.

Se la pressione invece è di parecchie atmosfere, si usa il mercurio, e il manometro è fatto con lunghe canne di ferro: per giudicare dell'altezza del mercurio, vi si fa galleggiare un pezzetto di ferro attaccato ad un filo, che passa su una puleggia e porta un contrappeso.

Nel caso però di forti pressioni, si adoperano più spesso i *manometri ad aria compressa*, uno de' quali si vede

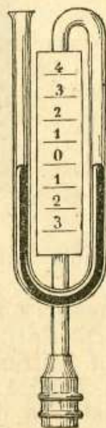


Fig. 130. Fig. 131.

nella fig. 132. La forza elastica che si vuole misurare si esercita per la chiavetta R, e spinge il mercurio comprimendo l'aria nel ramo chiuso, finchè la forza elastica di questa, che aumenta gradatamente col diminuire del volume, accresciuta della pressione idrostatica del mercurio, faccia equilibrio alla pressione che si vuol misurare. Bisogna che il tubo di vetro sia ben resistente, altrimenti potrebbe scoppiare con grave pericolo di chi gli sta dappresso. Al tubo poi i dà, per lo più, la forma conica, per evitare che le divisioni corrispondenti alle più alte pressioni siano troppo vicine, il che

produrrebbe non lievi errori nella misura della pressione. I manometri ad aria compressa si graduano confrontandoli con quelli ad aria libera.

Nelle industrie i manometri a mercurio sono poco adoperati; si usano in loro vece i *manometri metallici*, alcuni dei quali sono analoghi ai barometri aneroidi (§ 128). Il gas o il vapore s'introduce nel-

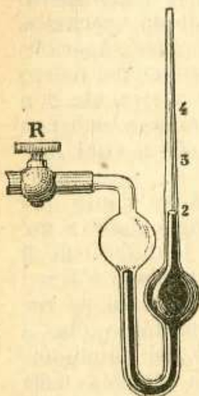
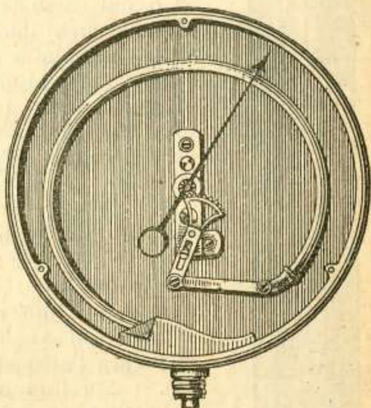


Fig. 132.


Fig. 133.

l'interno di un tubo appiattito di ottone incrudito o di acciaio a pareti sottili, piegato ad arco di circolo, chiuso a un capo, e aperto all'altro che si fa comunicare con lo spazio nel quale v'ha la pressione da misurare (fig. 133). Questa tende a raddrizzare il tubo; così l'estremo chiuso tira una leva ad angolo che fa ruotare un indice su di un arco graduato. La graduazione si fa col confronto di un manometro a mercurio.



Fig. 134.

136. **Manometro barometrico di Regnault.** — Per misurare le tensioni minori di un'atmosfera, servono altri manometri: quello di Regnault (fig. 134) è una modificazione del barometro normale. A fianco del tubo barometrico *b* è fisso un secondo tubo *a* di ugual diametro, col capo aperto nel mercurio della stessa vaschetta. Questo tubo alla sua parte superiore è messo in comunicazione, per mezzo di un rubinetto a tre vie *m*, sia con una macchina pneumatica, sia con l'apparecchio nel quale si vuol fare il vuoto.

Più la rarefazione è spinta innanzi, e più il mercurio si eleva nel tubo *a*; di guisa che la differenza di livello nel tubo barometrico *b* e nel tubo *a* fa conoscere la tensione residua. Non vi ha pertanto che a misurare l'altezza *ab* col catetometro, o con una scala metrica fissa all'istrumento, per avere con precisione la forza elastica nel recipiente dove si fa il vuoto.

Si può anche impiegare allo stesso scopo un barometro a sifone con rami di eguale lunghezza. Quando si fa comunicare il ramo aperto con il vaso nel quale si fa il vuoto, la colonna del barometro si abbassa gradatamente, e dalla differenza di livello del mercurio nei due rami si misura la pressione del gas.

137. **Tromba ad acqua.** — Dopo quanto si è detto sulle pompe ad aria, ritorniamo per un momento al barometro. Vedemmo come la pressione dell'aria è misurata da una colonna di mercurio di 76 centimetri di altezza, a livello del mare; ma l'acqua essendo circa 13 volte e mezzo meno pesante del mercurio a pari volume, avviene che la pressione dell'aria può tener sollevata una colonna di acqua alta circa 13 volte e mezzo l'altezza anzidetta della colonna di mercurio.

Infatti la pressione atmosferica regge una colonna d'acqua alta all'incirca 10 metri ed un terzo, ne' luoghi poco elevati sul mare (§ 123).

Ricordato questo, vediamo come operino le trombe comuni.

La figura 135 rappresenta una tromba di aspirazione. Nel fondo v'ha un serbatoio, dal quale vogliamo sollevare l'acqua; un tubo *T* conduce da questo serbatoio ad un corpo di tromba; nello stantuffo, che deve essere a buona tenuta, si trova una valvola *s'* che si apre all'insù, e nel fondo del cilindro vi è un'altra valvola *s* che s'apre pure verso l'alto. Insomma il cilindro di questa tromba ad acqua è simile a quello della pompa ad aria.

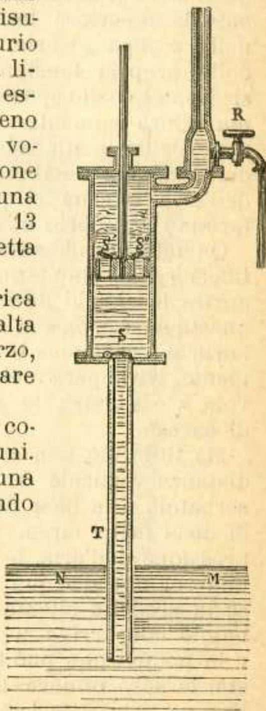


Fig. 135.

E qui pure possiamo cominciare col supporre che lo stantuffo sia al fondo del cilindro: allora, quando lo si solleva, l'aria esterna premendo sulla valvola superiore la terra chiusa, appunto come nella pompa ad aria. D'altra parte l'aria del tubo colla propria tensione apre la valvola inferiore e si espande nello spazio vuoto al disotto dell'embolo; ma allora aumentando di volume, essa premerà meno dell'aria atmosferica, e questa spingerà l'acqua del serbatoio a salire nel tubo, finchè la pressione dell'aria interna e quella idrostatica del liquido faranno equilibrio alla pressione esterna.

Quando poi abbasseremo lo stantuffo, la valvola inferiore si chiuderà, e quella dello stantuffo si aprirà lasciando uscire l'aria. Ripetendo più volte questa operazione, si riuscirà a estrarre quasi tutta l'aria e a riempire il tubo di acqua, la quale, finalmente, irromperà nel corpo di tromba per la valvola *s*, e seguirà lo stantuffo nel suo movimento di ascesa.

Ma tutto ciò non si potrebbe ottenere, qualora la distanza verticale fra la superficie dell'acqua nel serbatoio e la base dello stantuffo fosse maggiore di dieci metri circa. Difatti si è detto ora che la pressione dell'aria, a livello del mare, può reggere una colonna d'acqua alta circa 10 metri; perciò, se la predetta altezza è maggiore, l'acqua del serbatoio non arriva a riempire il corpo di tromba, e la pompa non può funzionare; invece, se tale distanza sarà minore, la tromba lavorerà a dovere e l'acqua entrerà nel cilindro.

Supponiamo ora che quest'ultimo sia pieno di acqua, e che si spinga all'ingiù lo stantuffo. La pressione comunicata ad esso si trasmetterà all'acqua e quindi alla valvola inferiore la quale resterà chiusa; d'altra parte la reazione dell'acqua

alla compressione forzerà la valvola superiore s' ad aprirsi, e l'acqua passerà al disopra dello stantuffo. Di poi, quando questo vien sollevato, l'acqua che vi sta sopra viene erogata pel tubo di scarico della tromba; e così di seguito, ad ogni moto di ascesa dello stantuffo l'acqua sarà erogata per questo tubo.

Si intende pure che, ove lo stantuffo non fosse a perfetta tenuta, la tromba non potrebbe agire. Inoltre, se la tromba non è di frequente adoperata, il cuoio che circonda l'embolo diventa secco e duro, e la macchina non funziona; in questo caso, per ottenere la chiusura, bisognerà rammollire il cuoio nell'acqua.

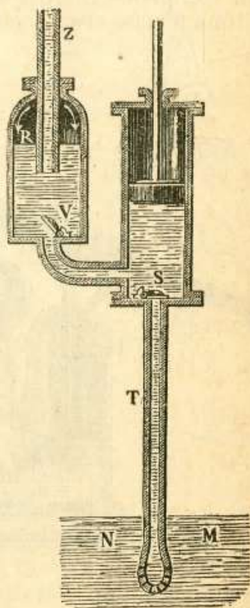


Fig. 136.

Nelle *trombe prementi* lo stantuffo è cieco, cioè senza valvola. La fig. 136 ne rappresenterebbe una se mancasse il tubo T di aspirazione; o, in altre parole, se il corpo di tromba fosse direttamente immerso nel serbatoio inferiore $M N$. Così, come la rappresenta la figura col tubo di aspirazione T, si chiama *tromba aspirante e premente*. Lo studioso intenderà facilmente da sè il giuoco delle due valvole S e V: il getto dell'acqua con questa pompa sarebbe intermittente, si verificherebbe soltanto allo

scendere dello stantuffo, senza l'aggiunta della *camera d'aria R.* Il tubo di erogazione *Z* si restringe in modo da far passare una quantità di liquido minore di quella che arriva per *V*, cosicchè l'aria si comprime in *R*, e con la sua forza elastica continua a spingere l'eccesso d'acqua che si trova nella

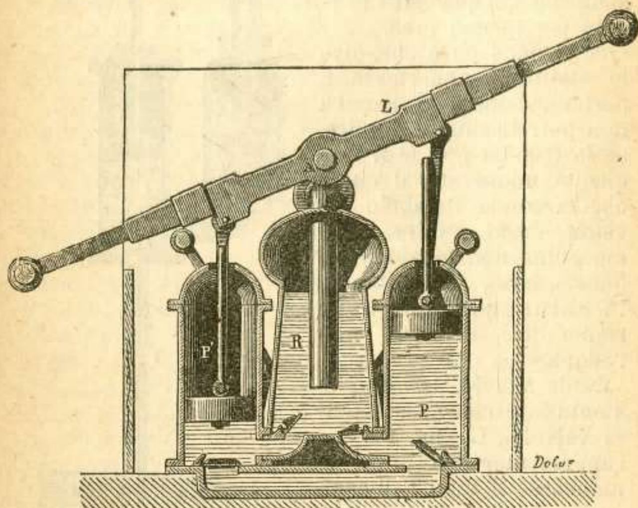


Fig. 137.

detta camera, come in una fontana di compressione. Agiscono così le pompe da incendi (fig. 137).

Con la pompa di aspirazione il lavoro si fa nell'inalzare lo stantuffo: la pressione da vincere in tal caso è eguale al peso di una colonna liquida che ha per base la sezione dello stantuffo, e per altezza la distanza di questo dal livello del serbatoio.

Con la pompa premente il lavoro si fa invece quando si abbassa lo stantuffo, e sarà tanto maggiore quanto più in alto si solleva l'acqua, e quanto maggiore è la sezione dello stantuffo.

138. **Fontana di compressione.** — Abbiamo ora visto come funziona una *fontana di compressione*, parlando del serbatoio d'aria compressa nelle pompe da incendio a getto continuo. Volendo costrurre una fontana di compressione, si prende un vaso chiuso munito d'un tubo che sbocca in *A* vicino al fondo, provveduto superiormente d'una chiavetta (fig. 138). Riempito il vaso per circa due terzi di acqua, vi si inietta poi dell'aria mediante una pompa di compressione. Per la maggiore pressione interna, l'acqua, quando si apre la chiave, è spinta all'esterno e forma uno zampillo.

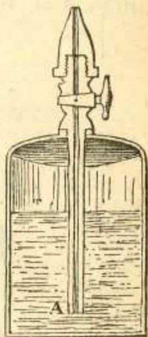


Fig. 138.

139. **Sifone.** — Prima di lasciare questo argomento, descriviamo il *sifone*, (fig. 139); esso serve più spesso a trasportare i liquidi da un vaso elevato in altro più basso. Affinchè operi, bisogna *adescarlo*, volgere cioè prima all'insù il sifone ed empirlo tutto di liquido; indi, chiuse l'estremità aperte, rovesciarlo e tuffare il ramo più corto sotto la superficie del liquido nel vaso più alto. Liberando allora anche l'altro estremo, il liquido fluirà con una corrente continua nel vaso inferiore. Difatti la pressione che risente una sezione del liquido presa nel ramo *D A*, da sinistra verso destra, è la pressione atmosferica diminuita di quella idrostatica dovuta alla colonna *D C*; da destra verso sinistra la pressione che risente la detta sezione è similmente

la pressione atmosferica diminuita di quella idrostatica dovuta alla colonna liquida BA. Si vede così che la prima supera la seconda, e l'efflusso deve accadere necessariamente dal ramo CD immerso nel serbatoio del liquido verso il ramo più lungo AB. In tal modo si può trasportare comple-

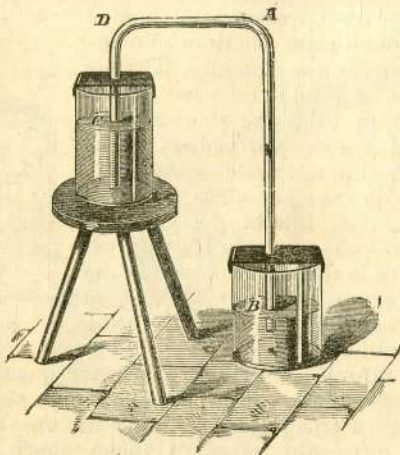


Fig. 139.

tamente il liquido da un vaso all'altro, purchè il tubo corto del sifone abbia bastevole lunghezza da giungere al fondo del vaso superiore.

Il sifone serve pure quando in un vaso si abbiano due liquidi sovrapposti di diversa densità, e si voglia levarne fuori uno solo senza smuovere il vaso che li contiene.

CAPITOLO VI.

Azioni molecolari nei gas.

140. **Costituzione cinetica dei gas.** — Abbiamo detto come si imagina che sia il moto delle molecole, che costituiscono i corpi solidi e liquidi; negli aeriformi vi ha maggior libertà dei movimenti delle molecole a cagione della maggiore distanza media che intercede fra esse, e si suppone che una molecola qualunque si muova in linea retta, e non devii se non quando s'imbatte in un'altra. Tali collisioni possono considerarsi come urti veri e proprii di corpi perfettamente elastici, ovvero come inflessioni delle loro traiettorie, analogamente a quanto succede delle comete con orbite aperte in prossimità del sole. Comunque sia la cosa, la velocità di una data molecola, a causa delle numerosissime collisioni con altre, varia con il tempo, ma la velocità media sarà la stessa per tutte, trovandosi tutte nelle stesse condizioni; e se la massa gasosa non fa scambio di energia con l'esterno, la somma delle forze vive di tutte le molecole rimarrà costante.

L'insieme degli urti che tutte queste molecole esercitano, come altrettanti piccoli proiettili, sopra una parete, costituisce la tensione del gas; la quale si ripartirà uniformemente in ogni direzione, perchè in grazia del numero grandissimo delle molecole

contenute in un recipiente, le molecole che in un dato tempo passano attraverso ad un piano ideale in un verso, pareggiano, nello stato di equilibrio della massa, quelle che vi passano in verso opposto.

Si intende da questo che col numero delle molecole presenti in un dato spazio deve crescere il numero degli urti, e che in conseguenza ad una maggiore densità corrisponderà una maggiore pressione (legge di Boyle). Se poi si riscalderà la massa gasosa (il che equivale, come vedremo, ad aumentare la forza viva molecolare media), e il volume non varia, gli urti cresceranno di numero e saranno più poderosi, onde ne verrà un aumento di pressione.

Noi non possiamo addentrarci in questa teoria; è bene però sapere che, partendo da ipotesi molto verosimili, si è giunti a stabilire una relazione tra la pressione e il volume di un gas, e la forza viva molecolare media. Indicando con H la pressione, con V il volume, con M la massa totale del gas supposto omogeneo, con u^2 il valore medio dei quadrati delle velocità delle singole molecole, a un dato istante, si ha:

$$\frac{3}{2} H V = \frac{M u^2}{2}$$

Questa relazione è detta comunemente *equazione di Clausius e Krönig.*

141. **Velocità molecolari.** — La formula di Clausius e Krönig porge il modo di determinare numericamente la velocità u corrispondente alla forza viva molecolare media de' vari gas. Si deduce infatti da essa che:

$$(1) \qquad u = \sqrt{\frac{3 H V}{M}} = \sqrt{\frac{3 H}{d}}$$

essendo d la densità del gas di cui si tratta.

Si vede che i varii aeriformi hanno diversa velocità molecolare, e propriamente quelli più leggeri l'hanno, a parità di circostanze, maggiore: l'idrogeno, essendo il più leggero di tutti, avrà dunque la velocità molecolare massima.

Per uno stesso gas poi la velocità molecolare non dipende dalla pressione, giacchè, variando questa, $\frac{H}{d}$ si mantiene costante (legge di Boyle). Si comprende difatti che coll'aumentare della pressione, se la temperatura resta costante, si restringe lo spazio concesso all'aeriforme; con ciò il numero delle collisioni aumenterà e crescerà la pressione sulle pareti del recipiente, ma la velocità delle molecole rimarrà immutata; essa, per un dato gas, dipende soltanto dall'energia termica, e quindi dalla temperatura. Quando questa aumenta, la densità diminuisce, e però — come indica la (1) — la velocità aumenta.

Troviamo ora la velocità molecolare dell'idrogeno a 0° e alla pressione di un'atmosfera, corrispondente alla forza viva media. Adottiamo le unità pratiche, e poichè la densità è uguale al peso specifico diviso per la gravità, dalla (1) si ha:

$$u = \sqrt{\frac{3Hg}{p}} = \sqrt{\frac{3 \times 10333 \times 9{,}8}{0{,}089}} = 1843^{m},$$

vale a dire una velocità che è quattro volte circa quella di una palla da cannone, ed è maggiore a temperature più elevate. Gli altri gas hanno velocità molecolari più piccole, ma pur sempre molto grandi: l'anidride carbonica, per esempio, nelle stesse condizioni dette per l'idrogeno, ha una velocità molecolare di 492^{m}.

Non bisogna confondere la u con la *velocità mo-*

lecolare media, che è la somma delle velocità vere a un dato istante divisa per il numero delle molecole; la quale, indicandola con Ω, si dimostra essere:

$$\Omega = u\sqrt{\frac{8}{3\pi}} = \sqrt{\frac{8H}{\pi d}}.$$

Ora con velocità così enormi parrebbe che i gas dovessero invadere un ambiente in un tempo brevissimo, che gli odori si dovessero propagare con una grande rapidità, mentre realmente questo non accade. Perchè? La ragione

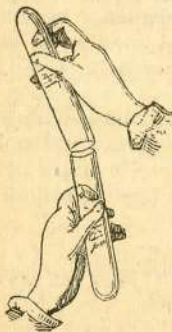


Fig. 140.

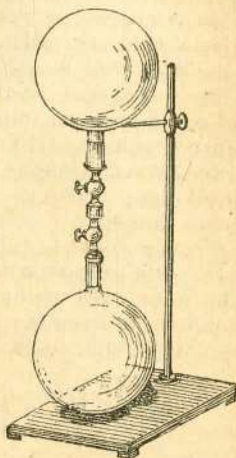


Fig. 141.

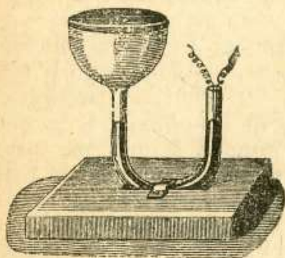
è facile: una molecola del gas, sebbene dotata di grande velocità, non può percorrere un brevissimo tratto senza fare un gran numero di collisioni con le altre molecole presenti in quello spazio; e però il cammino da essa in effetto percorso in ciascuna unità di tempo è relativamente piccolo. Così

succede che si può travasare l'anidride carbonica, ben più pesante dell'aria, da una provetta all'altra, come mostra la figura 140.

142. **Diffusione e diosmosi degli aeriformi.** — In grazia della velocità da cui sono animate le molecole dei gas, questi si mescolano spontaneamente in un recipiente, anche contrariamente all'azione della gravità: accade cioè dei gas ciò che accade dei liquidi, essi si diffondono, e con una velocità maggiore. Così, se nell'apparecchio della figura 141 il pallone inferiore è pieno di anidride carbonica, e il superiore di idrogeno che è molto più leggiero, quando si stabilisce la comunicazione fra essi aprendo le chiavette, i due gas si diffondono ben presto l'uno nell'altro e si forma un miscuglio omogeneo. Del pari, se si lascia a sè un pallone pieno di cloro o di anidride carbonica col collo aperto, si trova dopo qualche tempo che il cloro o l'anidride carbonica si sono diffusi nell'ambiente e che l'aria è tornata a riempire di nuovo il pallone.

La mescolanza si compie anche attraverso a un tramezzo o setto poroso, dando luogo al fenomeno della *diosmosi degli aeriformi,* analoga a quella dei liquidi. I setti porosi possono essere costituiti da porcellana poco cotta, da gesso, da membrane organiche, ecc., e la diffusione avviene nei loro pori sensibili. I gas più leggieri, le cui molecole sono dotate di maggior velocità, passano in maggior copia. Di questa circostanza si trae profitto per costrurre gli avvisatori di quelle mescolanze gasose esplosive, com'è, per esempio, l'aria mescolata col gas d'illuminazione, col gas delle miniere, ecc. Uno di tali avvisatori si vede nella fig. 142: consiste in un cannello piegato ad *U*, aperto da una parte, terminato dall'altra in un imbuto chiuso con lastra di terra porosa. Il tubo contiene mercurio che ar-

riva allo stesso livello nei due rami finchè vi è aria di fuori; ma se esternamente si trova idrogeno o gas di illuminazione, questi gas passano attraverso al setto in maggior copia che l'aria non ne esca, e determinano un aumento di pressione, per modo che il mercurio salendo nel ramo aperto, va a toccare due filini di platino che hanno le estremità disgiunte; così si chiude il circuito di una pila, dove è inserita una soneria elettrica che dà avviso del pericolo.


Fig. 142.

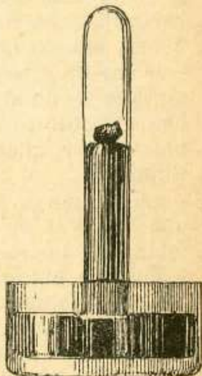
Secondo Graham che fece i primi studi accurati su questo argomento, *le velocità delle correnti osmotiche dei vari gas sono proporzionali alla pressione sotto la quale essi si trovano, e in ragione inversa della radice quadrata delle loro densità;* talchè, se la pressione dalle due parti del setto è la stessa, per ogni centimetro cubo d'aria vi passano

$$1 : \sqrt{0{,}069} = 3^{\mathrm{cm}^3}, 8 \text{ di idrogeno.}$$

Da questa legge risulta che la velocità della corrente osmotica è in ragione diretta della velocità molecolare; difatti, come esprime la (1) del § 141, la detta velocità è precisamente in ragione inversa della radice quadrata della densità: il setto poroso però fa sentire la sua influenza, e perturba alquanto la legge di Graham.

143. **Figure di Moser; assorbimento dei gas operato dai solidi.** — I solidi esercitano un'azione attrattiva sui gas, cosicchè può accadere che alcune

molecole di questi, dotate di minor velocità, ubbidendo a siffatta attrazione, restino aderenti alla superficie del solido o vengano assorbite nei pori sensibili. Così s'intende che i solidi non porosi, come il vetro p. es., devono avere la superficie rivestita da una specie di atmosfera molto più densa del gas che si trova nell'ambiente, come provano le *figure di Moser*. Eccone alcuni esempi: con uno stecchino di legno disegniamo una figura su una lastra di vetro: naturalmente non apparirà alcuna traccia, se tutto è pulito; ma alitandovi, il disegno comparisce. Copriamo una lastra di vetro con un foglio intagliato e alitiamovi sopra, in modo da produrre l'appannamento del vetro nei punti scoperti; quando tutto è tornato come prima, leveremo il foglio, e alitandovi di nuovo, ricomparirà il disegno. La spiegazione è questa: al contatto dello stecchino col vetro, le atmosfere aderenti ai due corpi si perturbano, scambiandosi una certa quantità di gas: cosicchè riescono poi diverse nei punti toccati e in quelli intatti l'attrazione del vapore acqueo e la sua condensazione. Parimenti nella seconda esperienza, la condensazione del vapore nei punti scoperti ha alterato la costituzione dell'atmosfera, e con essa la proprietà di condensare nuovo vapore.


Fig. 143.

I solidi porosi, come il carbone, la spugna di platino, ecc., presentando grande superficie sotto piccolo volume, producono effetti cospicui di assorbimento. Per mostrare questo fatto, facciamo una

semplice esperienza: capovolgiamo sul mercurio una campanina piena di mercurio, e facciamovi svolgere ammoniaca secca sino a riempirla di questo gas: poi, arroventato un carbone, spegniamolo tenendolo con le molle sotto il mercurio, e facciamolo arrivare in seno al gas (fig. 143). Vedremo allora il mercurio salire a poco a poco sino in cima: bisogna arroventare il carbone per liberarlo dal gas che potesse avere assorbito in precedenza, stando nell'aria.

Il carbone assorbe in maggiore quantità quegli aeriformi che si possono liquefare più facilmente, come il solfuro idrico, l'anidride solforosa, l'ammoniaca; per questa ragione esso è anche disinfettante.

La spugna di platino invece assorbe grandemente idrogeno, e ne consegue un riscaldamento così forte, che la massa di platino diventa rovente (accendi-gas automatici).

144. **Soluzione dei gas ne' liquidi; legge di Henry.** — Alcuni gas si disciolgono con grande facilità nell'acqua; se, p. es., nella precedente esperienza, si fosse fatto arrivare un poco d'acqua in seno all'ammoniaca contenuta nella campanina capovolta sul mercurio, si sarebbe veduto questo salire rapidamente sino in cima. Ma anche gli altri gas sono qual più qual meno solubili nell'acqua: p. es., l'acqua ordinaria tiene disciolti i gas ossigeno e azoto che formano l'atmosfera; basta scaldare un po' d'acqua e raccogliere le bollicine che si sollevano, e si trova ch'esse sono niente altro che aria, più ricca però di ossigeno relativamente a quella atmosferica, perchè l'ossigeno è, a parità di circostanze, più solubile dell'azoto. Così pure l'acqua di seltz è una soluzione di anidride carbonica nell'acqua.

Per farci una idea del modo col quale avviene l'assorbimento dell'aeriforme, immaginiamo un liquido e un gas entro uno spazio chiuso, com'è la bottiglia d'acqua di seltz (fig. 144), nella quale l'anidride carbonica è iniettata, sotto forte pressione, pel cannello che vi si vede nel mezzo e pesca sino al fondo, e dal quale erompe poi con impeto il liquido, quando s'apre la chiavetta che si trova in cima al cannello stesso. Nei primi istanti le molecole che riempiono lo spazio sovrastante urteranno nella loro corsa con le pareti del vaso e con le molecole che formano lo strato superficiale del liquido; anzi alcune penetreranno nella massa liquida. Ma nello stesso tempo accadrà che alcune di queste, già imprigionate nel liquido, arrivino, peregrinando qua e là, alla superficie con velocità sufficiente per liberarsi dal liquido. Succederà dunque che, mentre alcune molecole dell'anidride carbonica sovrastante al liquido penetreranno in questo, altre già penetrate se ne libereranno; l'equilibrio dinamico sarà allora raggiunto, quando il numero di quelle pareggerà il numero di queste. Giunte le cose a tal punto, si dice che il *liquido è saturo* di quel gas nelle condizioni di temperatura e di pressione dominanti.

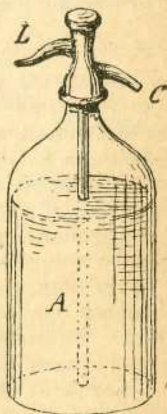


Fig. 144.

Ora è chiaro che quanto maggiore sarà il numero delle collisioni alla superficie del liquido, e tanto maggiore sarà la quantità di gas disciolto; ma il numero delle collisioni aumenta con la densità, e questa con la pressione, onde deve accadere che,

a temperatura costante, la quantità di un dato gas che può disciogliersi in una determinata massa di liquido è proporzionale alla pressione: questa legge è dovuta ad Henry.

L'aeriforme in soluzione in una determinata quantità di un liquido, avendo una massa proporzionale alla pressione, occuperà sempre lo stesso volume quando sia messo in libertà alla stessa temperatura e pressione; cosicchè se diciamo V il volume del gas, V' quello del solvente, il rapporto $\frac{V}{V'}$, detto *coefficiente di solubilità,* non dipende dalla pressione, ma solo dalla temperatura. Per esempio, il coefficiente di solubilità nell'acqua a 0° dell'anidride carbonica è 1,80, dell'ammoniaca è 1050; questi numeri rappresentano, per spiegarci, i litri di gas rispettivi che si disciolgono a 0° in un litro d'acqua, quando siano misurati alla pressione a cui avviene la loro soluzione.

È da notare che mentre la solubilità dei solidi aumenta con la temperatura, quella dei gas, al contrario, diminuisce; così avviene che scaldando l'acqua, l'aria si libera sotto forma di bollicine.

L'acqua di seltz che, come abbiamo detto, è una soluzione di anidride carbonica nell'acqua, quando è versata in un bicchiere aperto abbandonerà quasi tutto il gas; e propriamente ne conserverà per ogni litro una massa tale che occuperebbe il volume di 1,80 litri, quando fosse misurato a quella pressione che esercita l'anidride carbonica che si trova nella libera atmosfera. Allo stesso modo fanno i vini e le altre sostanze fermentate, che spumano e gorgogliano quando siano versate dal recipiente in tazze aperte.

145. **Dialisi.** — Supponiamo due gas separati da un liquido: ciascuno si scioglierà dalla sua parte,

ma poi arriverà a sprigionarsi nell'ambiente dell'altro, e così si mescoleranno; è un fenomeno analogo al passaggio dei liquidi attraverso a uno strato colloide. Così pure nei palloncini di gomma elastica, il gas illuminante del quale sono gonfi comincia a sciogliersi dalla parte interna dell'involucro, e l'aria dall'esterna: questa si scioglie in maggior quantità, perchè il suo coefficiente di solubilità è maggiore; i due gas poi finiranno per sboccare l'uno nell'altra. Accadrà pertanto che il gas illuminante ne esce e l'aria vi penetra in maggior copia; il palloncino è sempre gonfio, ma si fa più pesante e non sta più librato nell'atmosfera.

Questo fenomeno è detto *dialisi;* e *la velocità del passaggio dei varii gas è, con buona approssimazione, in ragione diretta della loro solubilità, e in ragione inversa della radice quadrata della densità* (Exner).

Anche taluni metalli roventi assorbono certi gas, e li lasciano passare come setti colloidi: il ferro, per esempio, lascia passare l'ossido di carbonio che è un gas venefico, e quindi nei caloriferi bisogna badare che i tubi di lamiera non si arroventino.

CAPITOLO VII.

Acustica.

116. **Moto oscillatorio dei corpi elastici; suono.** — Il moto periodico, oscillatorio o vibratorio, è caratterizzato dal fatto che, decorso un certo tempo (*periodo* della vibrazione), il mobile ripassa per la medesima posizione con la medesima velocità diretta nello stesso verso. Il pendolo è un esempio cospicuo di tale moto: in questo caso la forza che determina le oscillazioni è la componente del peso nel senso del moto, la quale, se le oscillazioni sono piccole, è in ogni istante proporzionale allo spostamento del punto mobile dalla sua posizione di equilibrio (§ 77).

Molti altri corpi possono oscillare come fa il pendolo: essi sono i corpi elastici, le molle, le corde, le membrane tese, ecc., ecc.; in questi corpi il moto è dovuto alle forze elastiche suscitate dall'avvenuta deformazione: e poichè esse variano di intensità, nella più parte dei casi, con la stessa legge della forza che sollecita il pendolo nel suo moto, così succede che le oscillazioni dei corpi elastici sono *isocrone* come quelle del pendolo (§ 78).

Sono tali oscillazioni che propagandosi per mezzo dell'aria, producono in noi, se abbastanza rapide, quella particolare sensazione che si chiama *suono*.

Ecco una verghetta che è fissa ad un sostegno pel suo capo inferiore: spostiamone alcun po' l'estremo superiore, e abbandoniamola liberamente a sè stessa. Che accade? essa si muove rapidamente innanzi e indietro (fig. 145), ossia è animata nel suo insieme da un rapido moto d'oscillazione. Il moto della verghetta è determinato da quello delle sue particelle [1]; queste si muovono allo stesso modo alternando continuamente il verso del movimento, or in avanti, or in addietro, e ad eguali intervalli di tempo, sono cioè anch'esse in istato di *vibrazione.* Se accosteremo l'orecchio, udremo distinto un suono.

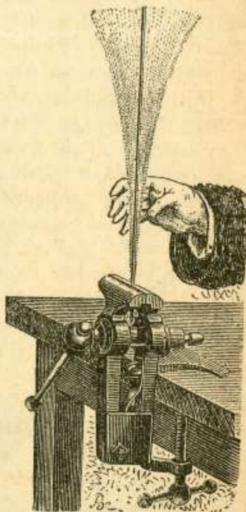


Fig. 145.

Prendiamo un vaso di vetro, fisso solidamente nel centro a un piede robusto, e attacchiamone l'orlo con un archetto (fig. 146): si ode un suono. A mostrare che questo è dovuto alle rapide vibrazioni del vaso, potremo accostargli, come fa vedere la figura, un pendolino leggero; ogni volta che questo toccherà l'orlo del vaso, ne sarà respinto vivamente.

E così ancora, una corda d'uno strumento musicale, pizzicata o sfregata con un archetto, manda un suono graditissimo; per persuaderci che essa

(1) Per particelle qui non bisogna intendere le molecole del corpo, ma gruppi di molecole.

vibra, basterà guardarla attentamente, e la vedremo rigonfia come un fuso nel mezzo. E se vi porremo a cavalcioni dei pezzetti di carta, questi ne saranno sbalzati via.

Ecco una canna da organo; essa è di legno, ma ha una parete di vetro per potervi guardar dentro. Collochiamone l'imboccatura su un mantice, e spingiamoci dentro una corrente d'aria. Questa viene periodicamente interrotta dalla imboccatura, e mette in vibrazione l'aria contenuta nella

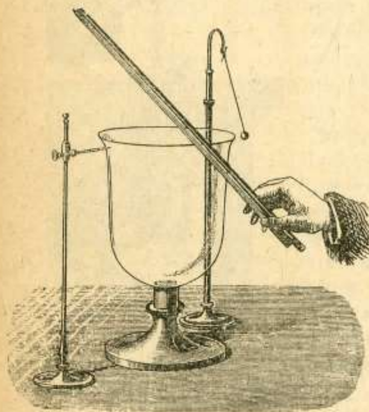


Fig. 146.

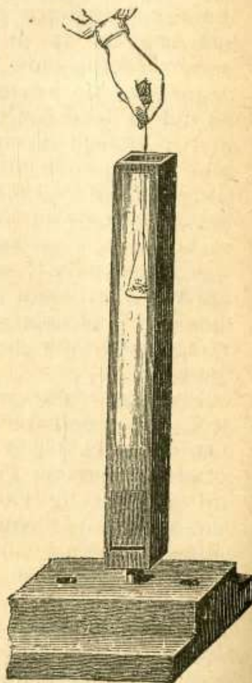


Fig. 147.

canna, che manda un suono assai dolce. Per convincerci che l'aria della canna è animata da un rapido moto di vibrazione, potremo affondare nella

canna una membrana tesa in un telaino e cosparsa di minuta sabbia (fig. 147); osserveremo che questa saltella rapidamente per le vibrazioni dell'aria.

Non solo i solidi elastici e i gas, vibrando rapidamente, producono un suono; ma anche i liquidi possono produrre lo stesso effetto. Si può verificare la cosa facendo passare una corrente di acqua, sotto una conveniente pressione, in quei fischietti di latta che sono la delizia dei fanciulli (fig. 148): anche in tal modo si produce un suono. Potremmo moltiplicare gli esempi all'infinito, e vedremmo sempre che ogni qualvolta un corpo elastico vibra abbastanza rapidamente, si produce un suono.

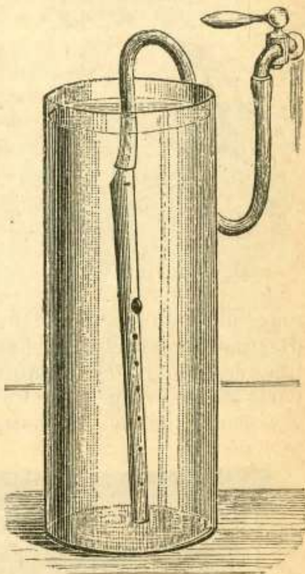


Fig. 148.

Vogliamo dire sin d'ora, per l'importanza che ha, anche il caso del *corista* o *diapason*. Consiste questo in una specie di forchetta d'acciaio con due rebbi o branche; per eccitarne le vibrazioni si può operare come indica la fig. 149, od anche meglio col mezzo di un archetto o di un'elettrocalamita collocata fra i due rebbi. Quando è montato sulla sua cassetta di risonanza (fig. 150), per una ragione che

vedremo, il suono diventa molto più intenso. Per vedere che i suoi rebbi sono animati da un rapido moto oscillatorio, si può sperimentare in molti modi,



Fig. 149.

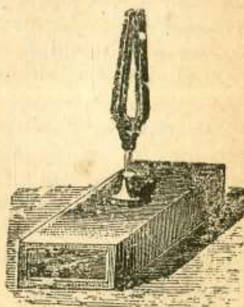


Fig. 150.

ma il più semplice è questo: muniamo uno dei rebbi di una piccola punta flessibile, e accostiamola a una lastra di vetro affumicata in modo da toccarla appena (fig. 151). Eccitando con un archetto il corista, tiriamo la lastra in una direzione nor-

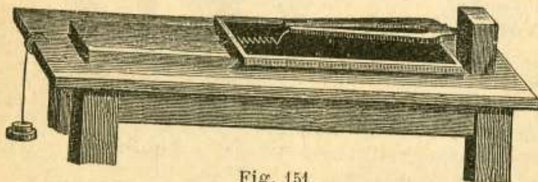


Fig. 151.

male alle vibrazioni. Se avremo operato a dovere, vedremo sul vetro disegnarsi una curva ondulata come quelle della fig. 152; essa è il moto risultante del moto oscillatorio del corista e di quello

uniforme della lastra. Se alla lente di un pendolo si unisce una matita che tocchi leggermente un foglio di carta, si vedrà su questo disegnarsi una curva simile, quando il pendolo oscilla e il foglio scorre in una direzione normale alle oscillazioni. Per questa ragione la curva disegnata dal corista è detta *pendolare:* essa prova il fatto molto interessante, che le oscillazioni di un corista sono semplici come quelle di un pendolo. È chiaro che un tratto

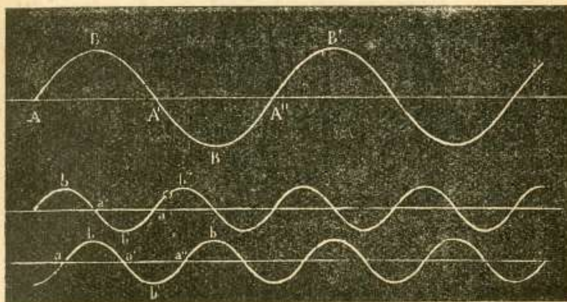


Fig 152.

come $A A' A''$ è disegnato nel tempo di una oscillazione totale, ed è detto *lunghezza dell'onda.* Tale lunghezza può esprimersi molto facilmente: se v è la velocità con cui si muove la lastra o il foglio, e τ è il tempo che il corista o il pendolo mette a fare un'intera oscillazione, la lunghezza d'onda λ è data dalla semplice relazione:

$$\lambda = v \tau.$$

147. **Propagazione del suono.** — Le vibrazioni del corpo sonoro si comunicano alle particelle del mezzo elastico che lo circonda, e il moto

si propaga per elasticità dalle più vicine alle più lontane, similmente a ciò che avviene in una fila di palle elastiche.

Se sospendiamo per mezzo di fili una serie di palle elastiche, in modo che i loro centri siano allineati e si tocchino appena l'una coll'altra (fig. 153),

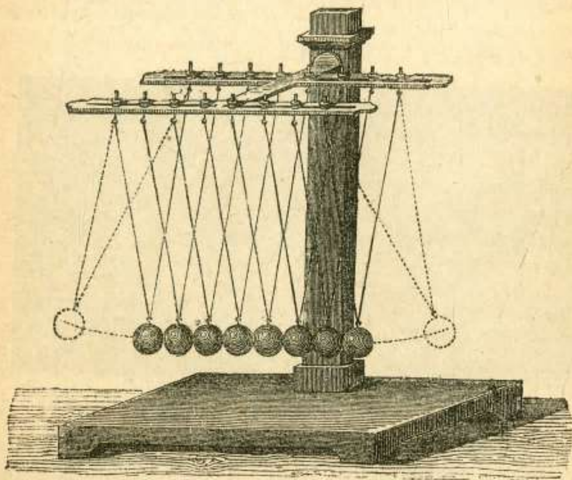


Fig. 153.

se ne solleviamo una che sta ad un capo della serie e la lasciamo andare, essa va a colpire la seconda cui cede la propria velocità. La seconda reagisce sulla prima e la ferma, mentre trasmette l'urto alla terza e si riduce pure alla quiete; la terza fa lo stesso, finchè l'impulso giunge all'ultima palla della serie, la quale non trovandone altra da urtare, si muove effettivamente pel colpo ricevuto. Ora la

prima palla può paragonarsi alle particelle d'aria che toccano il corpo sonoro, e l'ultima a quelle particelle che toccano la membrana del timpano. Questa serie di urti però non produce su di noi una sensazione sonora se non sono abbastanza rapidi; ne occorrono più di 16 al minuto secondo (Savart).

Per togliere ogni dubbio in proposito, dimostriamo subito con un facile esperimento che se fra la sorgente sonora e il nostro orecchio manca un mezzo elastico atto alla propagazione delle oscillazioni, il suono non si ode più.

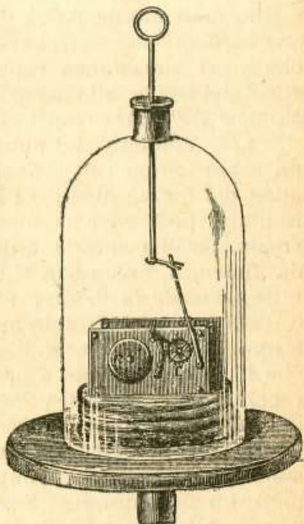


Fig. 154.

All'uopo prendiamo una soneria elettrica, od anche una campanella metallica urtata ripetutamente da un martelletto mosso da un elastro, e poniamola sotto una campana donde si estragga l'aria mercè la macchina pneumatica (fig. 154). Si abbia però la precauzione di collocare la soneria su un cuscinetto soffice di cotone, chè in caso diverso le oscillazioni verrebbero trasmesse all'aria esterna per mezzo del piatto della macchina, il quale è elastico.

Osserviamo che, sebbene la campanella sia sempre percossa allo stesso modo, al nostro udito il

suono arriva ognor più fievole a mano a mano che diminuisce la quantità d'aria rinchiusa nella campana; anzi, da ultimo, il suono si estingue quasi del tutto. Non essendovi aria, non vi è nulla che possa essere colpito dalle particelle vibranti della campanella, e perciò nessuna vibrazione giunge all'orecchio.

Riassumendo, si potrà dire che, affinchè s'oda un suono, sono necessarie tre cose: un corpo elastico che vibri abbastanza rapidamente, *un mezzo elastico* che serva alla propagazione delle sue vibrazioni, e l'*orecchio* com' è naturale.

148. **Velocità del suono.** — Il suono richiede un certo tempo per propagarsi da un punto a un altro del mezzo elastico che serve a trasmetterlo. Nell'aria possiamo persuadercene facilmente osservando ciò che accade quando si esplode un' arma da fuoco a una certa distanza: allora, prima di tutto, si vede la fiamma ed il fumo dell'esplosione, e dopo qualche secondo si ode il rumore del colpo; e appunto questi secondi corrispondono al tempo che il suono impiega a propagarsi dall'arma all'orecchio. La fiamma si vede quasi nello stesso istante in cui l'esplosione succede, e quindi contando il tempo trascorso tra la sensazione luminosa e quella sonora, si ha il tempo impiegato dal suono a compiere un tal cammino. Se, per esempio, l'esplosione accade alla distanza di un chilometro, e si contano 3 secondi fra la luce e il rumore, è segno che il suono impiega 3 secondi a percorrere questi 1000 metri nell'aria, ossia che esso si propaga colla velocità di 333 metri circa al secondo. Questa è appunto la velocità del suono nell'aria, alle temperature prossime a 0°.

Riflettendo poi che i vari suoni emessi contemporaneamente da un'orchestra arrivano insieme al-

l'orecchio di chi ascolta, per quanto lontano, conchiuderemo che la velocità di propagazione è indipendente dalla sorgente sonora, ma dipende soltanto dal mezzo.

149. **Formula che dà la velocità del suono nell'aria e negli altri gas.** — Abbiamo detto come si è potuta determinare la velocità del suono nell'aria per mezzo di dirette esperienze; ma quando sono note la elasticità e la densità del mezzo nel quale il moto ondulatorio si propaga, si può calcolare teoricamente la velocità. Il calcolo venne fatto da Newton, che per la detta velocità trovò l'espressione:

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}}, \tag{1}$$

nella quale e è la elasticità del mezzo data dal modulo di elasticità, e d la sua densità. Maggiore è la resistenza che un corpo oppone alla compressione, e più il suo ritorno al volume primitivo è energico e pronto quando la forza premente cessa di agire, ossia più esso è elastico; e, pari tutte le altre circostanze, maggiore è anche la velocità con cui il suono vi si propaga. Ma questa formula è in difetto se, applicandola all'aria, pel suo modulo di elasticità si prende la pressione atmosferica, la forza cioè necessaria a ridurre a metà, senza variazione della temperatura, il volume di una colonna di aria: la formula dà infatti, in tale ipotesi, $v = 280^m$ alla temperatura di 0°, e l'esperienza fornisce invece $v = 333^m$ a questa temperatura. Fu il grande matematico francese Laplace che diede la ragione del disaccordo tra la formula teorica e i dati dell'esperienza: l'aria si scalda quando è compressa e si raffredda quando è rarefatta; quindi le rapide compressioni e rarefazioni degli strati d'aria dovute

alla propagazione del moto oscillatorio, devono produrre variazioni di temperatura nel senso che gli strati compressi si riscalderanno, e quelli rarefatti si raffredderanno. Cosicchè la compressione farà aumentare l'elasticità dell'aria per due diverse ragioni, anzitutto accrescendo la densità, e poi pel calore che sviluppa. E così del pari nella rarefazione, la forza elastica diminuisce non soltanto per la diminuita densità, ma anche pel raffreddamento che l'accompagna. Newton non tenne conto che della densità, trascurando le variazioni di elasticità dovute alle suddette variazioni di calore.

Succede allora che gli strati compressi più caldi spingeranno con maggior forza gli strati contigui; e quelli rarefatti, esercitando una minor pressione anche a cagione del raffreddamento, richiameranno indietro gli altri strati con maggior forza. L'effetto è un accrescimento della velocità di propagazione; e Laplace, tenendo conto di queste circostanze, dimostrò che per avere dalla formula teorica la velocità vera della propagazione del suono d'accordo con la esperienza, bisogna moltiplicare la quantità sotto il segno radicale pel rapporto $\frac{c_p}{c_v}$ tra il calore specifico a pressione costante del gas e quello a volume costante; rapporto che per l'aria e i gas che meglio ubbidiscono alla legge di Boyle, è dato dal numero 1,41. Pertanto la velocità del suono in un gas avente la densità assoluta *d*, alla pressione *H*, sarà data dalla formula:

$$(2) \qquad v = \sqrt{\frac{H}{d} \times \frac{c_p}{c_v}} = \sqrt{\frac{H}{d} \times 1{,}41.}$$

Poichè per la legge di Boyle il rapporto $\frac{H}{d}$ si

mantiene costante per lo stesso gas, se la temperatura non varia, si vede che le sole variazioni barometriche non influiscono punto sulla velocità del suono: questa sarà la stessa sulla vetta di un monte o nel fondo di una valle.

Un'influenza notevole invece l'esercita ogni variazione di temperatura: se essa aumenta, la densità diminuisce, e quindi cresce la velocità, la quale, alla temperatura di 15°, è circa di 340 m.

Ricordiamo che $d = \frac{p}{g}$, dove p esprime il peso specifico; si ha sostituendo nella (2):

$$v = \sqrt{\frac{H}{d} \times \frac{c_p}{c_v}} = \sqrt{\frac{H}{p} \times g \times \frac{c_p}{c_v}}.$$

E poichè il peso specifico a una temperatura qualunque è legato al peso specifico alla temperatura di 0° dalla relazione $p = \frac{p_0}{1 + \alpha t}$, nella quale α è il coefficiente di dilatazione cubica del corpo, e pe' gas è $\alpha = 0{,}00367$, si ottiene in generale:

$$v = \sqrt{\frac{H}{p_0}(1 + \alpha t) \cdot g \cdot \frac{c_p}{c_v}}.$$

Supponiamo l'aria alla temperatura di 0° e alla pressione normale di 76^{cm} di mercurio: se si adottano le unità pratiche, essendo la pressione normale atmosferica sopra 1^{m^2} eguale a 10333^{kg}, e pesando 1^{m^3} di aria in tali condizioni $1^{kg}, 293$, si ha sostituendo:

$$v = \sqrt{\frac{10333 \times 9{,}8}{1{,}293} \times 1{,}41} = 333^m$$

numero che si accorda con quello che fornisce l'esperienza.

Completiamo queste nozioni intorno alla propagazione del suono negli aeriformi, dando la velocità del suono in alcuni gas alla temperatura di 0°, determinata sperimentalmente da Dulong:

Aria	$332^m,8$
Ossigeno	$317^m,0$
Idrogeno	$1269^m,2$
Acido carbonico . . .	$261^m,5$
Ossido di carbonio . . .	$337^m,4$
Protossido d'azoto . . .	$261^m,8$

Teoricamente le velocità del suono nei gas devono essere inversamente proporzionali alle radici quadrate delle loro densità; si vede che questa conseguenza della teoria è confermata dalla esperienza. L'ossigeno, per esempio, pesando 16 volte più dell'idrogeno, e la radice quadrata di 16 essendo 4, la velocità del suono nell'idrogeno deve essere quadrupla di quella nell'ossigeno, come è difatti.

150. **Velocità del suono nell'acqua.** — Il suono si trasmette altresì attraverso l'acqua: anzi in essa si propaga con una velocità maggiore che attraverso l'aria. La fig. 155 mostra come il suono di un corista si propaghi attraverso all'acqua, sino alla cassetta di risonanza sottoposta. Gli esperimenti fatti sul lago di Ginevra dal Colladon dimostrarono che la velocità di propagazione del suono nell'acqua è 1435 metri per secondo, ossia circa quattro volte maggiore che nell'aria.

151. **Velocità del suono ne' solidi.** — Anche i solidi, come, p. es., il legno ed il ferro, trasmettono il suono con grande rapidità. Tale velocità teoricamente è data dalla formula (1), ma si può anche trovarla sperimentalmente. Nel legno, ad esempio, la velocità di propagazione è circa 10 volte maggiore che nell'aria, nel ferro 17 volte. Si può constatare facilmente che la velocità del suono è maggiore in

un metallo che nell'aria. Se alla estremità di una lunga sbarra di ferro, per esempio, si dà un colpo, una persona che tenga l'orecchio vicino all'altra estremità, udrà due colpi: il primo trasmesso lungo la sbarra, il secondo attraverso all'aria.

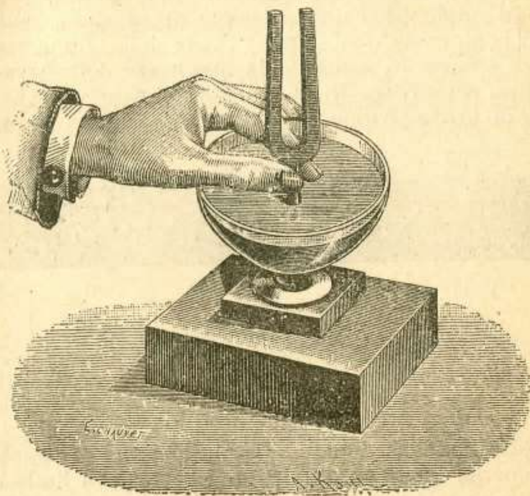


Fig. 155.

152. **Onde longitudinali nell'aria; lunghezza d'onda.** — Sia una colonna d'aria limitata da un tubo cilindrico, e supponiamo che uno stantuffo impegnato nel tubo ad una estremità oscilli innanzi e indietro, come farebbe il rebbio di un corista. Evidentemente esso non spingerà innanzi a sè la colonna d'aria come se fosse un cilindro rigido; ma imaginando divisa la detta colonna in tanti

sottili strati normali alla lunghezza del tubo, accadrà, come nella fila delle palle elastiche, che il primo strato urtato dallo stantuffo comunicherà il suo moto al secondo, questo al terzo, e così via; e ne risulterà una condensazione dell'aria in un tratto del tubo. Se, per esempio, lo stantuffo nel muoversi in avanti impiegherà un centesimo di secondo, risulterà compresso uno strato di aria della lunghezza di $3^m,4$ circa. In generale, la lunghezza dello strato di aria compressa si otterrà moltiplicando la velocità di propagazione per la durata dell'escursione.

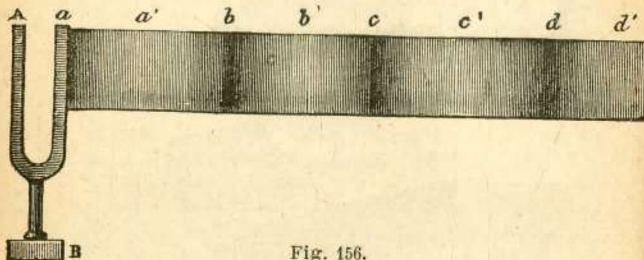


Fig. 156.

Siffatta condensazione andrà propagandosi indefinitamente lungo il cilindro; ma se, appena finita la escursione in avanti, lo stantuffo torna indietro, impiegando pure un centesimo di secondo, l'aria verrà rarefatta nel tubo per lo stesso tratto di $3^m,4$ più vicino allo stantuffo, nel mentre la condensazione si sarà propagata di altrettanto. Cosicchè un tratto d'aria lungo $6^m,8$ sarà per metà condensato e per metà rarefatto. La medesima vicenda si ripeterà a ogni oscillazione completa dello stantuffo: ogni andata (oscillazione semplice) produrrà una condensazione; ogni ritorno (altra oscillazione semplice) una rarefazione; ossia una serie di onde si propa-

gherà lungo il tubo (fig. 156), e ciascuna onda completa sarà per metà condensata e per metà rarefatta.

Ecco come possiamo ora rappresentare simbolicamente lo stato dell'aria lungo il tubo, mentre continua il moto vibratorio dello stantuffo. Dai punti d'una retta *A B* parallela al tubo (fig. 157) si tirino delle perpendicolari aventi lunghezze proporzionali alla differenza fra la pressione dell'aria nello strato corrispondente e la pressione ordinaria: si otterranno così, relativamente all'istante che si

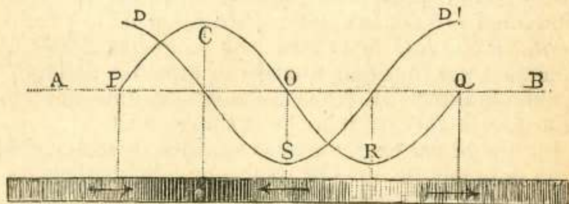


Fig. 157.

considera, tante curve eguali a *P C O R Q*, la quale è una sinusoide se lo stantuffo si muove come un pendolo. La parte *P C O* al disopra di *A B* indica la mezza onda condensata, e quella *O R Q* al disotto la mezza onda rarefatta.

Se imaginiamo che la curva *P C O R Q* si muova di moto uniforme da sinistra a destra con velocità uguale a quella delle onde, essa percorrerà, ad ogni periodo, un tratto uguale alla propria lunghezza; e colle sue ordinate fornirà in un tempo qualunque le variazioni di pressione dell'aria nei punti corrispondenti. Dopo quanto si è spiegato, è superfluo dire che nella propagazione delle onde è lo stato di maggior o minor pressione che si trasporta nello

spazio, e non l'aria stessa. Le particelle dell'aria devono bensì spostarsi, senza di che sarebbe impossibile il loro condensarsi e diradarsi, ma i loro moti consistono in oscillazioni intorno a quelle posizioni che occupavano prima del passaggio delle onde.

Possiamo con una curva rappresentare pure gli spostamenti delle particelle dalla loro posizione di equilibrio nel moto ondulatorio longitudinale, convenendo di portare al disopra della retta *A B* gli spostamenti verso destra, e sotto di essa quelli diretti verso sinistra. Si ottiene così la nuova curva simbolica *D S D'*, la quale confrontata colla precedente *P C O R Q* fa vedere che le variaziazioni di densità sono massime quando lo strato è nella posizione naturale di riposo, e sono minime quando esso arriva all'estremità dell'escursione.

Inoltre la rappresentazione grafica insegna che, a un dato istante, in ciascuna semionda condensata, come pure in ciascuna semionda rarefatta, gli spostamenti delle particelle dalla loro naturale posizione di equilibrio sono opposti e simmetrici rispetto ai centri di massima pressione (o densità) nella semionda condensata, e di minima pressione (o densità) nella semionda rarefatta. La parte inferiore della figura indica con le freccie il senso di tali spostamenti.

È poi chiaro che ciascuna particella d'aria eseguirà la stessa oscillazione dello stantuffo e nello stesso tempo, ma la comincierà e la finirà tanto più tardi quanto più lontana si trova dal corpo vibrante.

Nell'aria libera il moto ondulatorio, anzichè in una sola direzione, come ora si è supposto, si propaga tutto all'intorno del corpo sonoro per onde sferiche che vanno sempre più allargandosi, a so-

miglianza di quegli anelli che vediamo formarsi gettando un sasso in un'acqua tranquilla. L'aria che circonda il corpo sonoro, se la velocità di propagazione è la stessa in tutti i sensi, si troverà divisa, a un dato istante, in tanti involucri sferici alternativamente compressi e rarefatti. Un'onda intiera comprendente una semionda condensata e una semionda rarefatta, avrà una lunghezza λ data dalla relazione semplicissima:

$$\lambda = v\,\tau,$$

dove v indica la velocità di propagazione, e τ il tempo di una *oscillazione completa* del corpo vibrante, come si disse al § 76.

Si vede che la lunghezza d'onda è il cammino percorso dal moto ondulatorio nel tempo (periodo) che il corpo sonoro impiega a fare una intiera oscillazione. La *superficie d'onda* poi è formata da tutte le particelle del mezzo a cui arriva contemporaneamente un medesimo impulso, ed è sferica quando la velocità di propagazione è la stessa in tutte le direzioni, come accade appunto nell'aria tranquilla. Si chiama *raggio sonoro* un raggio dell'onda.

153. **Riflessione del suono.** — Le onde sonore quando incontrano nella loro propagazione una superficie elastica, vengono da essa riflesse; tutti i punti cioè della superficie incontrata dal moto oscillatorio diventano a loro volta tanti centri di vibrazione, i quali producono onde che componendosi formano un sistema di onde retrogrado.

Sia A (fig. 158) l'origine del suono; ed $E E_1$ il luogo che occuperebbe una porzione della superficie d'onda progredita da A durante il tempo t, se non ci fosse la parete elastica in $M M'$. Ciascun punto di questa parete, venendo incontrato dall'onda, diventerà a sua volta un centro sonoro; così alla fine

del tempo t, il punto B avrà mandato la propria onda parziale fino alla distanza $B\ E_1'$, cioè su una sfera di raggio eguale a $B\ E_1'$; analogamente il punto D su una sfera di raggio $D\ E'$, e così via. Tutte queste sfere saranno tangenti ad $E\ E_1$, come pure alla sfera $E'\ E_1'$ simmetrica alla precedente, e che può considerarsi come descritta dal punto A' simmetrico di A. Quest'onda è il movimento riflesso.

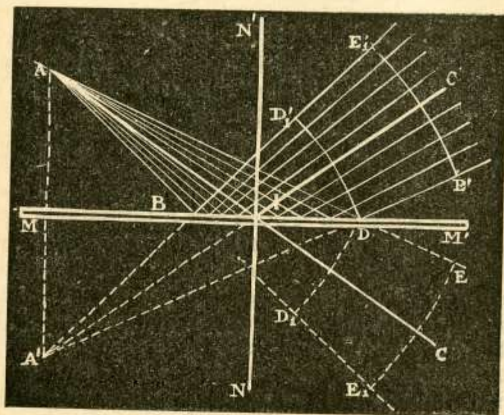


Fig. 158.

Se consideriamo un fascetto piccolissimo $A\ I$, esso si riflette secondo $I\ C'$, e si vede che l'angolo d'incidenza $A\ I\ N'$ è eguale all'angolo di riflessione $N'\ I\ C'$, essendo $N'\ I\ N$ la normale alla superficie nel punto d'incidenza. Tutto accade cioè come se il suono riflesso provenisse da un punto A' posto dietro l'ostacolo $M\ M'$ simmetrico di A. Questo punto si chiama l'*imagine sonora* del punto A.

La riflessione del suono segue le stesse leggi della riflessione della luce, e le superficie che concentrano la luce, concentrano anche il suono: i battiti di un orologio (fig. 159), collocato nel fuoco di uno specchio sferico di ottone, si odono distintamente quando si ponga l'orecchio nel fuoco di un altro specchio coniugato col primo, anche se posto ad una certa distanza.

Eccone la ragione: gl'impulsi dati all'aria dall'orologio battono contro la faccia interna del corrispon-

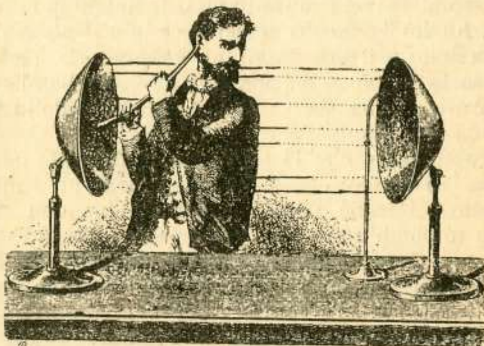


Fig. 159.

dente specchio; di là vengono tutti riflessi in direzione parallela sull'altro specchio, dal quale sono analogamente riflessi ed avviati all'orecchio, posto nel fuoco di esso. Similmente, il più piccolo rumore che si produce in uno de' fuochi d'una volta elissoidale si percepisce distintamente all'altro fuoco: in questo modo si spiega ciò che accade nelle gallerie parlanti. In quella di San Paolo a Londra, le parole pronunciate da un lato della cupola sono trasportate al lato opposto, ad una no-

tevole distanza. Un fenomeno analogo succede nel portico del Palazzo della Ragione a Milano. Nella cattedrale di Girgenti v'è un punto vicino alla porta occidentale, d'onde il più leggero bisbiglio è trasportato e riprodotto in un altro punto vicino all'altare maggiore.

154. **Eco.** — Il cammino percorso dal suono riflesso per giungere ad un punto qualunque, è sempre maggiore del cammino del suono diretto che si propaga in linea retta: ne deriva che il suono riflesso si trova sempre in ritardo sul suono diretto. Ora, finchè l'ostacolo si trova vicino, il ritardo non è sensibile e i due suoni si confondono insieme; ma se la distanza è considerevole, essi rimangono separati e si ha *l'eco*, ossia il fenomeno della ripetizione del suono.

Supponiamo che la superficie riflettente sia disposta in modo che il suono ritorni al punto di partenza, Perchè l'eco sia distinta, bisogna che le onde impieghino nell'andata e nel ritorno un tempo almeno eguale alla durata del suono. Così, bisognando circa un $^1/_5$ di secondo per pronunciare una sillaba, l'ostacolo dovrà esser lontano 34 m. per ottenere un'eco monosillaba distinta: difatti durante $^1/_5$ di secondo il suono percorre 68 m.; con una distanza doppia l'eco sarebbe bisillabica, ecc. Gli echi multipli sono dovuti a riflessioni successive fra due ostacoli opposti: così accade in un vasto fabbricato, detto la Simonetta, poco fuori di Milano. Un effetto analogo produce l'alta cupola del battistero di Pisa.

155. **Suono e rumore.** — Se i corpi eccitano nell'aria moti irregolari, come per esempio carri o treni in movimento, allora si produce un *rumore.* Se invece il corpo compie vibrazioni regolari abbastanza rapide, allora si produce un *suono mu-*

sicale. Una sensazione musicale, dice Helmholtz, consiste per l'orecchio in un suono perfettamente calmo, uniforme, invariabile. Il movimento del pendolo ordinario, per esempio, è periodico, e le sue oscillazioni nell'aria determinano delle onde che si succedono a intervalli troppo lunghi per eccitare il nervo acustico. Affinchè si produca un suono musicale, è necessario che un corpo vibri con la regolarità del pendolo, ma che possa imprimere all'aria ondulazioni molto più rapide; se il movimento impresso al nervo uditivo da ciascuna vibrazione della serie dura fino all'arrivo della vibrazione seguente, le impulsioni periodiche si fonderanno insieme per formare un suono musicale continuo. Occorre per questo che le vibrazioni non siano meno di 16 al minuto secondo: se un uccello battesse le ali con questa rapidità o una maggiore, il volo suo nell'aria sarebbe accompagnato da un suono; questo difatti accade per acunil insetti che battono l'ali con rapidità sufficiente.

Tornando alla distinzione fra suoni e rumori, è bene per altro avvertire che essa non può farsi nettamente in ogni caso: un colpo isolato di un'assicella che cade, pare un rumore; ma facendone cadere di seguito parecchie, scelte convenientemente, si possono riprodurre le note della scala musicale. Così lo scroscio di una cascata, il sibilo del vento, possono acquistare un vero valore musicale, e quindi il carattere di suoni.

156. **Caratteri distintivi dei suoni.** — I suoni musicali, compresi quelli della voce umana, si distinguono fra loro per tre caratteri fondamentali: *intensità, altezza, metallo* o *tempera.*

L'intensità dipende dalla forza viva maggiore o minore che in un dato tempo arriva all'orecchio. L'altezza, ossia la proprietà dei suoni di essere più

gravi o acuti, dipende dal periodo delle oscillazioni, e quindi dal numero delle vibrazioni che il corpo sonoro fa in un secondo. Il metallo o la tempera dei suoni, per cui il suono di un istrumento si distingue da quello di un altro, dipende dalla legge di oscillazione, ossia dal modo di vibrare del corpo sonoro. Diciamo ora in particolare di ciascuno di tali caratteri.

157. **Intensità del suono.** — La forza viva che arriva all'orecchio, e quindi l'intensità del suono, dipende evidentemente dalla massa e dall'ampiezza d'oscillazione delle particelle del corpo sonoro: inoltre i suoni vanno indebolendosi con la distanza quando si propagano liberamente per onde sferiche, perchè l'energia del corpo sonoro si comunica a superficie sempre più estese, le quali crescono secondo i quadrati dei loro raggi; onde l'energia che arriva all'unità di superficie, e quindi l'*intensità del suono varia in ragione inversa del quadrato della distanza della sorgente sonora.*

Ma questa legge non vale più quando il suono si propaga in tubi cilindrici, come sono i tubi parlanti che servono alle comunicazioni fra punti lontani di un vasto edificio: in tal caso difatti la superficie dell'onda non aumenta coll'allontanarsi dalla origine, e non c'è altra perdita di energia sonora che quella ceduta alla parete del tubo, la quale è piccola se il tubo è grande, diritto e non ha piegature brusche. Nei *portavoce* la riflessione del suono sulle pareti fa sì che i raggi delle onde si pieghino verso l'asse del tubo, e che la superficie dell'onda, propagandosi, cresca meno rapidamente che nella propagazione sferica, cosicchè vi sarà una minor perdita di intensità con la distanza.

I *cornetti acustici* sono fondati pure sulla rifles-

sione delle onde, ed hanno lo scopo di concentrare sul timpano la forza viva di una maggiore superficie dell'onda.

L'intensità del suono dipende inoltre dalla densità del mezzo, nel quale esso si propaga. Nell'idrogeno il suono è meno intenso che nell'aria; e sulle alte montagne, dove l'aria è rarefatta, bisogna parlare più forte per farsi udire anche a breve distanza. Così il suono del campanello posto sotto la campana della macchina pneumatica, va indebolendosi mano a mano che l'aria diventa più rara.

Un'altra causa che influisce sulla intensità del suono è l'agitazione dell'aria e la direzione del

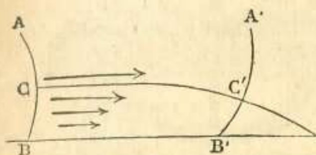


Fig. 160.

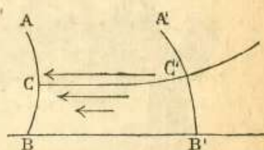


Fig. 161.

vento: l'esperienza prova che il suono è, pari le altre circostanze, più intenso quando l'aria è calma, che quando essa è agitata; e se spira il vento, l'intensità nella direzione del vento è maggiore che nel senso contrario, poichè combinandosi la velocità di propagazione del suono con quella del vento, succede che le onde si piegano verso terra nel primo caso (fig. 160), e verso l'alto nel secondo (fig. 161). Oltre a ciò le correnti d'aria ascendenti e discendenti concorrono a turbare la *trasparenza acustica* dell'atmosfera.

E accadrà pure un indebolimento del suono ogni volta che la sua propagazione avviene da un mezzo più raro a uno più denso: così, male si udrà nella

valle lo scoppio di un'arma da fuoco in montagna, mentre esso si udrà assai meglio nel verso opposto.

158. **Altezza dei suoni; come si trova il numero delle vibrazioni corrispondenti ad un dato suono.** — Per convincerci che l'altezza di un suono dipende dal numero delle vibrazioni nell'unità di tempo, ricorreremo all'apparecchio della fig. 162, detta ruota di Savart. Una grande ruota *A*, girando,

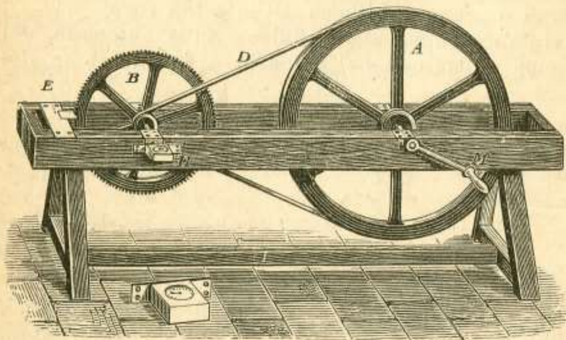


Fig. 162.

comunica col mezzo di una cinghia un rapido moto di rotazione alla ruota dentata *B*, i cui denti sono tutti eguali e alla medesima distanza. Ora se un cartoncino vien posto in *E* contro i denti della ruota, ognuno di questi nel suo passaggio urterà il cartoncino, e questo vibrando darà un suono: si constata allora che se la ruota gira lentamente, il suono è grave; se essa gira più veloce, il suono a mano a mano diviene più alto.

Qualora si voglia trovare il numero delle vibra-

zioni per secondo corrispondenti ad una data nota, si procederà così: si gira la manovella grado a grado più veloce, finchè il cartoncino urtato dia appunto una nota della medesima altezza di quella che si vuol misurare; e quando si è trovata la conveniente velocità, si continua a girare la manovella al modo stesso, almeno per un minuto o

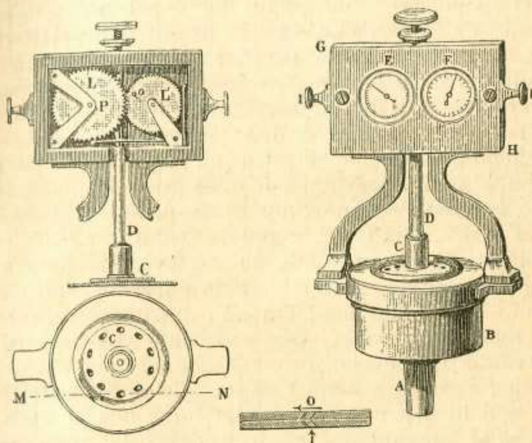


Fig. 163.

più. Alla ruota *B* è congiunto un contatore di giri; moltiplicando il numero de' giri pel numero dei denti, e dividendo per il tempo dell'esperienza espresso in secondi, si ha il numero delle vibrazioni richieste.

Ma codesto metodo è poco adatto: meglio si riesce a valutare il numero delle vibrazioni di un dato suono, servendosi della sirena. Quella di Cagnard-Latour è rappresentata dalla fig. 163: essa

consiste in una scatola cilindrica *B*, nella quale col mezzo di un mantice si fa arrivare una corrente d'aria attraverso al condotto *A*: il coperchio della scatola ha una serie circolare di fori equidistanti; al di sopra, a breve distanza, si trova un dischetto metallico *C* girevole intorno ad un asse verticale *D*, e recante una serie identica di fori, in esatta corrispondenza con quelli del coperchio. Supponiamo che i fori siano 25; in un giro completo del dischetto *C*, 25 volte la corrente d'aria uscirà a sbuffi dai detti fori, e 25 volte periodicamente sarà interrotta. Questo efflusso intermittente produrrà delle condensazioni e delle rarefazioni nell'aria ambiente, cosicchè si udrà un suono che corrisponde a 25 vibrazioni per ogni giro del dischetto. Per mantenere il movimento di questo, si fanno i suoi fori e quelli del coperchio non verticali, ma inclinati di 45°, in modo che le loro direzioni formino un angolo retto; così la corrente d'aria urtando nel gomito che formano i due canaletti, mette in moto il disco; e, per una data velocità della corrente di efflusso, il moto del disco diverrà uniforme, quando il lavoro motore della corrente d'aria e il lavoro resistente delle forze che si oppongono al movimento, quali l'attrito, la resistenza del mezzo, ecc., si faranno equilibrio Quando questo è raggiunto, l'altezza del suono si mantiene costante; esso sarà più grave o più acuto, a seconda della minore o maggior pressione della corrente d'aria del mantice.

Il numero delle vibrazioni per secondo di ciascuna nota si determina col mezzo di un contatore, che, al momento voluto, si fa ingranare con l'alberetto verticale del disco; questo all'uopo porta una vite perpetua in cui si impegnano i denti di una ruota. Occorre anche un esatto conta-secondi,

le cui lancette si possano mettere in moto e fermare a volontà, premendo un bottone.

Ciò posto, per determinare il numero delle vibrazioni corrispondenti ad un dato suono, si regola la corrente d'aria del mantice, caricandolo più o meno di pesi, sino ad ottenere dalla sirena una nota perfettamente all'*unisono* con il suono studiato; allora si mette in moto il contatore della sirena, e nello stesso istante si preme il bottone del conta-secondi; e finalmente, coll'operazione inversa, si fermano le lancette dei due istrumenti. Se per es. 1000 è il numero dei giri compiuti in 10 secondi, essendo il numero de' fori 25, si ha che la nota sperimentata corrisponde a 2500 vibrazioni.

Ripetendo simili determinazioni, si trova che due suoni all'*unisono*, in qualunque modo prodotti, risultano sempre del medesimo numero di vibrazioni, ossia hanno la stessa altezza.

159. **Metodo del sonometro.** — Per riuscire con la sirena a determinare il numero delle vibrazioni di un corpo sonoro nel modo che si è detto, bisogna poter disporre di un buon mantice a corrente continua, e regolare a piacere la corrente d'aria: in caso contrario, la sirena non dà un suono di altezza costante, e non si riesce a metterla all'*unisono* con il suono che si vuol misurare.

Il seguente metodo di determinare il numero delle vibrazioni di un corpo sonoro, è il più spedito e il più semplice. Esso é basato su una legge delle vibrazioni delle corde tese, che dimostreremo in appresso: *il numero delle vibrazioni di una corda tesa, se la tensione non varia, è in ragione inversa della sua lunghezza.* Tendiamo pertanto una corda su un *sonometro* (fig. 164): questo consiste in una cassetta rettangolare MN, la quale porta all'estremità due ponticelli fissi A e B dove si appoggia la

corda da sperimentare. Essa è fissata a un capo, e la sua tensione si opera all'altro, sia con una chiave D come quelle che servono ad accordare i pianoforti, sia col farla passare su la gola di una puleggia e stirandola con un peso. Volendo limitare la parte vibrante della corda, la si preme con un dito sopra un terzo ponticello C che si sposta a piacere lungo il sonometro; e la lunghezza della parte vibrante si legge su una scala metrica, disposta lungo la corda.

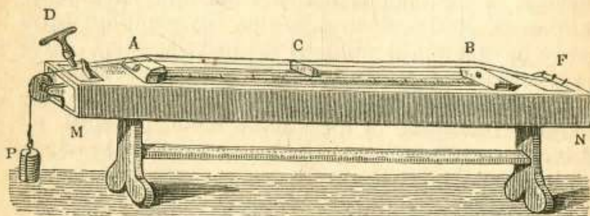


Fig. 164.

Vediamo ora come si possa fare con tale strumento la misura in discorso: troviamo la lunghezza l della corda che sia all'unisono con un suono di cui è noto il numero delle vibrazioni, p. es. con un corista di 128 vibrazioni compiete (do_2). Ciò posto, per conoscere il numero n delle oscillazioni di un altro suono, faremo scorrere il cavalletto C fino a trovare la lunghezza l' della corda che vibrando riproduca esattamente questo suono.

In base alla legge suddetta che il numero delle vibrazioni della corda è in ragione inversa della sua lunghezza, si ha:

$$l : l' = n : 128$$

da cui

$$n = \frac{128 \,.\, l}{l'} \,.$$

160. **Metodo grafico per determinare il numero delle vibrazioni di un corista.** — Vogliamo da ultimo dire come graficamente si possa determinare il numero delle vibrazioni, al minuto secondo, di un corista. Muniamo uno de' rebbi di una piccola punta come nell'esperimento della fig. 151; ma il corista invece di scrivere le proprie oscillazioni su una lastra affumicata, le disegni su una carta che ricopre il cilindro *EF* (fig. 165): su l'asse di questo

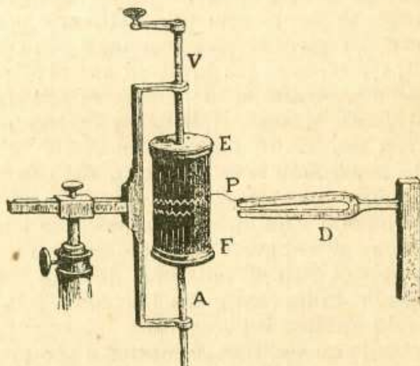


Fig. 165.

è tracciata una vite, in modo che ad ogni giro che esso fa, sale o scende, secondo il verso, di un passo. Ora, se il diapason vibra parallelamente all'asse del cilindro, su la carta si disegna una linea sinuosa, ciascuna sinuosità della quale corrisponde evidentemente a una vibrazione. Imaginiamo adesso un pendolo a secondi che a ogni sua oscillazione chiuda un circuito elettrico, in modo che una scintillina scocchi fra la punta e il cilindro; contando il numero delle sinuosità comprese fra due traccie della

scintilla, si avrà esattamente il numero delle oscillazioni del corista a ogni secondo.

161. **Intervallo musicale.** — Nel linguaggio musicale è detto *intervallo* il rapporto dei numeri delle vibrazioni di due suoni di differente altezza; e l'orecchio giudica che l'intervallo dipende unicamente da tale rapporto, e non dal numero assoluto delle vibrazioni dei due suoni.

Vi sono intervalli che producono sull'orecchio una gradevole impressione, e sono detti *accordi;* altri invece ne producono una cattiva, e son detti *dissonanze.* Gli accordi più consonanti sono quelli di *ottava* (2 : 1), di *terza* (5 : 4), di *quinta* (3 : 2); questi, presi insieme, costituiscono l'*accordo perfetto maggiore,* il quale si può riprodurre toccando i tasti *do, mi, sol,* do_2 di un pianoforte. Come si vede, *i suoni che accordano bene fra loro, sono in un rapporto semplice quanto al numero delle vibrazioni.* Ma siccome non v'ha un criterio assoluto per giudicare quando il rapporto fra due numeri cessa di esser semplice, così si vede che difficile cosa è di stabilirne un limite esatto fra l'accordo e la dissonanza; solo giudice è l'orecchio.

162. **Scale musicali matematica e temperata.** — A riprodurre gli effetti di accordi e di dissonanze, si è adottata una *scala musicale,* o gamma di note, come segue:

do	re	mi	fa	sol	la	si	do_2
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2,

dove sono indicati il nome delle note e i numeri di vibrazioni proporzionali corrispondenti. Si vede che da *do* si sale gradatamente in acutezza fino all'ottava do_2.

Questa serie di suoni abbraccia una sola *ottava;*

ma viene prolungata dalle due parti ripetendo i medesimi intervalli con lo stesso ordine, e distinguendo le note delle varie ottave con indici numerici. Gli intervalli tra una nota e l'altra di detta scala, sono:

$$\begin{array}{cccccccccccccccc} do & & re & & mi & & fa & & sol & & la & & si & & do_2 \\ & \frac{9}{8} & & \frac{10}{9} & & \frac{16}{15} & & \frac{9}{8} & & \frac{10}{9} & & \frac{9}{8} & & \frac{16}{15} & \end{array}$$

È detto *tono maggiore* l'intervallo $\frac{9}{8}$, *tono minore* l'intervallo $\frac{10}{9}$, *semitono* l'intervallo $\frac{16}{15}$. E poichè l'orecchio apprezza molto bene degl'intervalli anche minori di quelli che sono fra le diverse note, si arricchì la serie aggiungendovi i *diesis* e i *bemolli*, note cioè più alte o più basse di quelle citate nel rapporto di 25 a 24.

Questa è la scala *naturale* o *matematica*, dove gli intervalli tra le successive note sono diversi; volendo seguire tale scala, bisognerebbe accrescere notevolmente i suoni di un'ottava per i diesis e i bemolli; o siccome nell'armonia si esige di poter cominciare la scala da una nota qualunque, ne verrebbe una grande complicazione nelle esecuzioni musicali. Per semplificare le cose e rendere più spedita l'esecuzione della musica, si è adottata un'altra scala detta *temperata*, un po' diversa da quella naturale, la quale risponde alle varie esigenze. Nella scala temperata l'intervallo di ottava (2 : 1), è stato diviso in 12 intervalli eguali detti *semitoni*, eguali a $\sqrt[12]{2} = 1{,}05946$; si aumenta cioè di un semitono il valore di una nota e si ottiene il vero *diesis*, moltiplicando il numero delle vibrazioni per 1,05946; e, viceversa, si abbassa il valore di una nota di un semitono e la si porta al *bemolle*, divi-

dendone il numero delle vibrazioni per 1,05946. Tale scala è quella del pianoforte, dove i tasti bianchi corrispondono alle note fondamentali, e i neri ai diesis o ai bemolli.

163. **Corista normale.** — Si è finora parlato di rapporti fra i numeri delle vibrazioni delle diverse note e non di numeri assoluti delle vibrazioni, perchè la scala e i suoi accordi sostanzialmente non mutano, sia che risultino da suoni acuti, sia da suoni gravi. Ma se si vogliono eseguire dei pezzi con più strumenti o più voci, chiara cosa è che bisognerà prender tutti le mosse da una nota di determinata altezza; e bisognerà anche poterla riprodurre con esattezza e con comodità. La nota scelta è il la_3 di 435 vibrazioni, e la si riproduce col *corista* o *diapason normale,* come venne fissato nel congresso internazionale di Vienna. Il corista prototipo in Italia viene conservato nell'Istituto fisico dell'Università di Roma.

164. **Limiti dei suoni udibili e della voce umana.** — Se il corpo sonoro non vibra abbastanza rapidamente, le sue oscillazioni non si fondono in un'unica sensazione, e non si produce un suono; il suono più basso che l'orecchio umano può percepire è quello formato da 16 vibrazioni complete al secondo, cui corrisponde nell'aria una lunghezza d'onda di $21^m,25$ circa. Ma vi è anche un limite superiore che venne determinato dall'Helmholtz in un suono di 40.000 vibrazioni al secondo, al quale corrisponde un'onda lunga $0^m,0085$. Sicchè non tutti i movimenti vibratori dei corpi producono in noi la sensazione sonora, ma quelli soli compresi fra i detti limiti, i quali del resto possono variare alquanto da un individuo all'altro; l'orecchio dunque non può percepire come suono un numero di vibrazioni minore o maggiore di questi. La musica scarta

tutti i suoni di un numero di vibrazioni minore di 27 e maggiore di 4500; i primi perchè troppo bassi, gli altri perchè troppo acuti e striduli, gli uni e gli altri antiestetici.

La voce umana poi abbraccia appena quattro ottave: le voci maschili di basso e di tenore vanno dal mi_1 di 82 V al fa_3 di 348 V, e dal la_1 di 109 V al si_3 di 489 V; le voci femminili di contralto e di soprano dal fa_2 di 174 V al fa_4 di 696 V, e dal do_3 di 261 V al do_5 di 1044 V. Le voci di contralto e di soprano sono quasi all'ottava alta rispettivamente delle voci di basso e di tenore. L'acutezza della voce varia poi da persona a persona con la lunghezza delle corde vocali, e in uno stesso individuo con la loro tensione.

165. **Come vibrano i vari corpi; vibrazione delle corde.** — È quistione della massima importanza per la scienza e per la musica studiare come vibrano i diversi corpi sonori; ma noi, in questo manuale, dobbiamo limitarci a pochissimi cenni, poichè una vasta trattazione dell'argomento ci porterebbe fuori della via prefissa, e richiederebbe cognizioni di matematica che non possiamo presupporre nel lettore.

Attacchiamo una fune con un gancio al soffitto, o meglio un tubo di gomma elastica pieno di sabbia; tirandone moderatamente un estremo, diamogli un colpo secco come indica la freccia F (fig. 166). La deformazione progredirà lungo la fune con una velocità tanto maggiore quanto più grande sarà la tensione e piccola la massa di questa, e propriamente si dimostra che la velocità v è data dalla relazione:

$$v = \sqrt{\frac{T}{M}}$$

dove T è la tensione, e M la massa dell'unità di lunghezza della fune. Questa rimarrà diritta davanti e dietro il segmento inflesso, perchè lo strato spostato reagisce sul precedente e lo ferma, nel mentre sollecita il seguente a muoversi dalla stessa parte: accade lo stesso nella fila di palle elastiche della fig. 153, con la differenza però che nel caso della fune il movimento dei vari segmenti si fa trasversalmente, in direzione perpendicolare alla propagazione, anzichè longitudinalmente. Giunta la deformazione al punto fisso superiore, si rifletterà e tornerà indietro dalla parte opposta con la stessa velocità. Non ci occupiamo ora di questo moto riflesso, ma supponiamo che l'estremo A, invece di ricevere un solo impulso, compia un'oscillazione pendolare; nel tempo di questa oscillazione il moto si propagherà lungo la fune ad una certa distanza, e invece di un sol tratto assai piccolo come dianzi, si troveranno spostati contemporaneamente gli strati di un segmento tanto più lungo, quanto maggiori saranno la durata di oscillazione e la velocità di propagazione, e un'onda si propagherà lungo la fune. Tutti i suoi punti eseguiranno trasveralmente un'oscillazione di eguale durata e di eguale ampiezza dell'estremo A, soltanto che

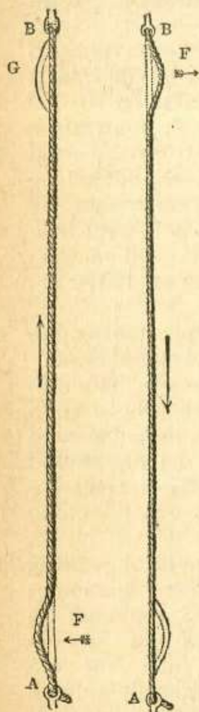


Fig. 166.

la cominceranno e la finiranno tanto più tardi, quanto maggiore sarà la loro distanza da esso; ma fuori dell'onda la fune conserverà la sua forma rettilinea.

Se poi l'estremo compirà regolarmente più oscillazioni pendolari di seguito, allora, essendo che a ogni oscillazione un'onda prende origine e si propaga lungo la fune, questa prenderà una forma ondulata.

Possiamo intender bene la propagazione delle onde trasversali in un filo teso nel seguente modo: imaginiamo una serie di particelle inizialmente in

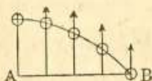


Fig. 167.

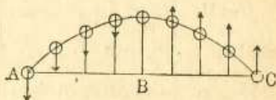


Fig. 168.

equilibrio lungo la retta *AB*, e supponiamo che l'estremo *A* compia una oscillazione pendolare in direzione normale ad *AB*. La fig. 167 mostra la disposizione delle particelle all'istante $\frac{T}{4}$, essendo T il periodo e contando i tempi a partire dall'inizio della vibrazione della particella *A*. Nel detto istante questa particella ha raggiunta la sua posizione estrema; quelle che seguono sono rimaste indietro di *A* avendo esse cominciato il loro movimento più tardi; le frecce indicano la direzione del moto di ciascuna di esse. Tutte le particelle a destra di *B* si trovano ancora in riposo.

Nella fig. 168 sono rappresentate la disposizione delle particelle e la direzione del loro movimento alla fine del mezzo periodo $\left(\frac{T}{2}\right)$; il punto *A* ha

allora effettuata una semivibrazione e ripassa per l'origine, *B* un quarto di vibrazione, e il movimento di vibrazione si è propagato fino a *C*.

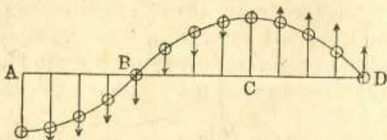


Fig. 169.

La fig. 169 mostra analogamente la distribuzione delle particelle e la direzione del loro movimento all'istante $\frac{3}{4}T$, nel quale *A* ha raggiunto la sua elongazione massima negativa, *B* ha compiuto una semivibrazione, *C* un quarto di vibrazione, e *D* è sul punto di incominciare il suo movimento.

Infine la fig. 170 rappresenta ciò che si verifica alla fine del periodo *T* contato, come si è detto, a

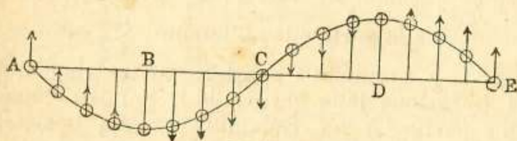


Fig. 170.

partire dal principio del movimento di *A*; questa particella ha allora compiuto una vibrazione completa e sta per cominciare la seconda; *C* ha compiuto una semivibrazione, e il movimento si è propagato fino alla particella *E* che è sul punto di cominciare la sua prima vibrazione.

I punti A ed E si allontanano dunque simultaneamente dalla loro posizione di equilibrio, e la loro velocità sono dirette nello stesso verso: è evidente che i loro movimenti saranno sempre nella medesima fase; la distanza AE, come si è detto innanzi, si chiama *lunghezza d'onda*, e si indica con λ. In generale, si chiama lunghezza d'onda la distanza di due punti i più vicini che si trovano nella identica fase: essa è la distanza alla quale si propaga il movimento vibratorio nel tempo di un periodo, ossia nel tempo che una particella impiega a compiere una vibrazione completa.

I punti come A e C invece (fig. 170) che in un dato istante hanno la stessa velocità, ma diretta in verso contrario, sono *in opposizione di fase;* la loro distanza evidentemente è uguale a mezza lunghezza d'onda.

Si comprende ora come ad ogni vibrazione completa dell'estremo della fune tesa, un'onda si propagherà lungo di essa, e come tutte queste onde, propagandosi con la stessa velocità, abbiano la stessa lunghezza se il periodo non muta; cosicchè la fune prenderà la forma della fig. 171. I punti egualmente spostati e dalla medesima parte hanno la stessa velocità, sono nella stessa fase di vibrazione e distano di un numero intero di lunghezze d'onda; al contrario, i punti egualmente spostati dalla posizione d'equilibrio, ma dalla parte opposta, hanno velocità uguali ma di segno contrario, ossia sono in opposizione di fase e comprendono fra essi un numero dispari di semilunghezze d'onda.


Fig. 171.

166. **Onde stazionarie.** – Tendiamo ora una corda sul *sonometro* (fig. 164), e attacchiamola con un archetto verso un'estremità: si generano due sistemi d'*onde progressive* che si propagano in senso contrario; e cioè le *onde incidenti* provocate dall'archetto le quali si muovono lungo la corda in un verso, e le *onde riflesse* che provengono dalla riflessione delle prime e si muovono in verso contrario. Questi due sistemi di onde si compongono in un sistema di *onde stazionarie*, onde cioè nelle quali tutti gli strati della corda passano simultaneamente per la loro posizione di riposo e simultaneamente arrivano agli estremi della loro corsa. Ma le escursioni sono diverse: massime in alcuni punti equidistanti detti



Fig. 172.

ventri, e minime per altri detti *nodi*, i quali non mutano di posto col progredire dei due sistemi di onde componenti: la distanza fra due nodi o due ventri consecutivi corrisponde a mezza lunghezza di onda. Nei due punti estremi ove la corda è fissa, si formano naturalmente due nodi; e se essa vibra in tutta la sua lunghezza, senz'altri nodi intermedii, nel mezzo si forma un ventre; allora la corda vibrando dà la nota fondamentale, ossia la nota più bassa, e all'occhio assume l'aspetto di un fuso (figura 172).

Ma la corda si divide in due internodi e dà l'ottava se viene eccitata a $^1/_4$ circa della sua lunghezza, e si tocca leggermente nel mezzo con una barba di penna (fig. 173).

Si dividerà in tre internodi e renderà la quinta dell'ottava, se sarà toccata leggermente con una penna ad un terzo della sua lunghezza (fig. 174).

Si può verificare la cosa mettendo a cavalcioni della corda piccoli cavalierini di carta; quelli dei nodi resteranno pressochè fermi, gli altri dei ventri saranno sbalzati fuori.

Si può anche ottenere una spontanea suddivisione della corda in tanti fusi di vibrazione, con nodi e ventri fissi, senza toccarla mentre essa vibra. Serve



Fig. 173.

bene all'uopo l'apparecchio di Melde: si tende una cordicella, p. es. verticalmente, fissandone l'estremo inferiore al rebbio di un corista elettromagnetico, e avvolgendo superiormente la cordicella attorno ad un piuolo, come si usa nella chitarra, per operarne la tensione.

Regolando questa, accadrà che lungo la funicella non possano stabilirsi che onde di determinata lunghezza; eccitando allora l'elettrocalamita e fa-

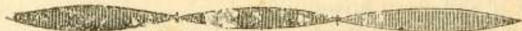


Fig. 174.

cendo vibrare il corista, si propagano lungo il filo due serie di onde trasversali, una diretta, l'altra riflessa, e il filo si divide da sè in un certo numero, variabile con la tensione, di nodi e ventri così netti che sono una meraviglia a vedere.

I suoni dati da una corda nelle condizioni ora dette costituiscono la *serie dei suoni armonici:* il più grave di essi è detto *nota fondamentale;* la corda, quando dà questo suono, vibra formando un sol fuso.

In tal caso la sua lunghezza è eguale a mezza lunghezza d'onda, ossia è:

$$l = \frac{\lambda}{2};$$

e poichè $\lambda = \frac{v}{n}$, essendo v la velocità di propagazione delle vibrazioni lungo la corda ed n il loro numero al minuto secondo, si ha:

$$n = \frac{v}{2\,l}.$$

Questa notevole relazione dice che il numero delle vibrazioni che la corda fa in 1^s, è, pari le altre circostanze, in ragione inversa della sua lunghezza. Ci siamo già serviti di questa legge (§ 159). Sostituendo poi per v il suo valore, si ha:

$$n = \frac{1}{2\,l}\sqrt{\frac{T}{M}} = \frac{1}{2\,r\,l}\sqrt{\frac{T\,g}{\pi\,p}}.$$

dove r esprime il raggio della sezione della corda, e p il suo peso specifico.

Or dunque il numero delle vibrazioni di una corda tesa in un secondo è:

1° in ragione inversa della lunghezza della corda;

2° in ragione inversa del suo diametro;

3° in ragione diretta della radice quadrata del peso tensore;

4° in ragione inversa della radice quadrata della densità.

Si approfitta di queste leggi ne' varii *strumenti a corda*. Le corde più leggiere, più fine, più brevi, maggiormente tese danno i suoni più acuti, come succede nell'arpa, nel pianoforte; nel violino, nel violoncello, ecc., che hanno corde meno numerose

ed egualmente lunghe, per le note acute serve il *cantino* che è di minugia e leggiero, e per quelle gravi le corde metalliche che sono più pesanti; inoltre si profitta della diversa tensione, e si limita col polpastrello la parte vibrante in modo da ottenere dalla medesima corda suoni di diversa altezza.

167. **Risonanza.** — Prima di studiare in qual modo l'aria vibri ne' tubi sonori, è necessario spiegare il fenomeno della *risonanza*.

Gioverà per questo fare un'esperienza: prendiamo un diapason ed eccitiamolo; il suo suono quasi non si ode, e se lo avviciniamo all'orlo di una provetta (fig. 175), il suono è rinforzato molto debolmente. Se ora modificheremo la lunghezza della colonna di aria versando cautamente dell'acqua nella provetta, arriverà un momento in cui il suono sarà grandemente rinforzato, perchè la colonna d'aria, entrando in vibrazione anch'essa, aggiungerà il suono a quello debole del corista. Ma perchè la colonna d'aria entri anch'essa in vibrazione, qual'è la condizione necessaria? Questa è che il suo periodo di vibrazione sia eguale a quello del corista, vale a dire che la corda sia atta a dare un suono della medesima altezza del corista. Tale fatto può verificarsi soffiando sul bordo della provetta; ogni volta che essa potrà rinforzare il suono, se ne caverà una nota all'unisono con quella del corista. La fig. 176 mostra analogamente come il suono di un timbro metallico venga rinforzato, avvicinandogli una camera d'aria di acconcie dimensioni.



Fig. 175.

Notiamo intanto che si stabilisce un sistema di onde stazionarie fra quelle incidenti e quelle riflesse dal fondo della provetta: nel capo aperto del tubo si formerà un ventre, all'estremità chiusa un nodo; e però la lunghezza della colonna d'aria corrisponderà a un quarto della lunghezza d'onda del suono del corista.

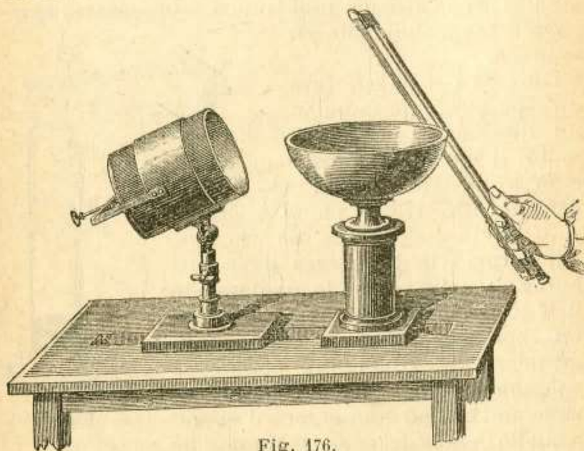


Fig. 176.

È per questa ragione che si muniscono i diapason della loro cassetta di risonanza; il suono ne risulta notevolmente rinvigorito, ma le vibrazioni si spengono più presto, perchè parte dell'energia sonora si comunica all'aria della cassetta stessa.

Su questo principio sono fondati i *risonatori di Helmholtz:* essi hanno forma cilindrica o sferica (fig. 177), e ciascuno, a seconda della capacità, rinforza un suono dato ed è sordo, o quasi, per gli altri. Nel condotto auditivo si impegna il capezzo-

lino *A*, e l'apertura *B* si rivolge verso la sorgente sonora: se nell'aria v'è il suono corrispondente al risonatore adoperato, esso si udrà chiaramente, per quanto debole sia. Le casse armoniche dei violini, delle chitarre, ecc., hanno invece una forma complicata, suggerita dalla esperienza, e rinforzano in eguale misura tutti i diversi suoni che l'istrumento può dare.

Facciamo ora anche quest'altra esperienza: prendiamo due coristi identici, che diano cioè esattamente la stessa nota, montati sulle loro cassette di risonanza, e poniamoli di fronte l'uno all'altro ad una certa distanza. Eccitando l'uno, e spegnendone subito dopo le vibrazioni col toccarlo con la mano, si udrà il suono emesso dall'altro corista; ma se si modifica un poco il suono di uno di essi, attaccando a un rebbio una moneta con la cera, ogni effetto di risonanza sparisce. Così e non altrimnti si comportano due pendoli: difatti collocando l'uno accanto all'altro due pendoli esattamente della stessa lunghezza, e facendo oscillare uno di essi, si vedrà poco dopo oscillare anche l'altro.



Fig. 177.

La spiegazione del fenomeno non è difficile: quando il primo pendolo si muove in un senso, comunica al secondo, per mezzo dell'aria, un impulso che lo solleciterà a spostarsi dalla medesima parte; allorchè poi quello ritornerà indietro, anche questo farà lo stesso, essendo la durata di oscillazione indipendente dall'ampiezza, e quindi riceverà un secondo impulso nel senso del movimento. Così seguitando, accadrà che i detti impulsi si sommeranno, e il secondo pendolo finirà per acquistare un'ampiezza di oscillazione notevole. Ben diversa-

mente procedono le cose quando i periodi d'oscillazione de' due pendoli sono diversi; in tal caso le loro oscillazioni facendosi ora in concordanza, ora in opposizione di fase, accadrà che i successivi impulsi comunicati da uno di essi si elideranno, ed il secondo pendolo rimarrà fermo.

168. **Tubi sonori.** — I tubi sonori rispondono, come si è notato, a quelle sole vibrazioni che convengono alla loro lunghezza. Così, quando si soffia sull'orlo di un cannello, la lamina di aria, infrangendosi sui bordi di questo, produce un miscuglio di suoni molto deboli, e il cannello rinforza soltanto quelli che gli sono proprii.

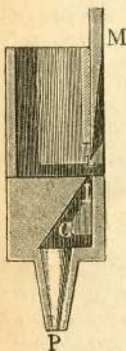


Fig. 178.

La stessa cosa succede nel flauto e nelle canne da organo con *imboccatura a flauto.* Se ne può vedere in sezione una nella fig. 178; l'aria spinta dal mantice, passando per una sottile fenditura, va a frangersi sibilando contro il *labbro I M*; la canna rinforza, come si è detto, quel suono che le conviene. Nelle canne aperte, quando rendono il suono fondamentale, si formano due ventri all'estremità e un nodo nel mezzo a causa della composizione delle onde incidenti con le onde riflesse, analogamente a quanto succede nelle corde; i ventri e i nodi sono però permutati. Ma se la corrente d'aria viene aumentata, la canna, specialmente se di piccola sezione, ottavizza, dà cioè l'ottava alta e non più la fondamentale; e rinforzandosi ancora detta corrente d'aria, la canna darà gradatamente tutta la serie de' suoni armonici della nota fondamentale. Nel caso dell'ottava, al posto del nodo si formerà nel mezzo un ventre; e poichè due ventri consecu-

tivi comprendono sempre fra loro un nodo
versa, si formeranno due altri nodi intermedii;
lunghezza d'onda diventa cioè la metà.

Così succede nelle canne aperte: in quelle chiuse all'estremità superiore si forma un nodo invece di un ventre, e la lunghezza della canna, quando dà il suono fondamentale, anzichè corrispondere a mezza lunghezza d'onda come prima, corrisponde solamente a un quarto. Si deduce da qui che una canna aperta dà una nota fondamentale che è l'ottava alta di quella di un tubo chiuso di pari lunghezza. Aumentando la corrente d'aria, le canne chiuse danno solo gli armonici di grado dispari; così dalla fondamentale si passa subito alla quinta dell'ottava, ecc.

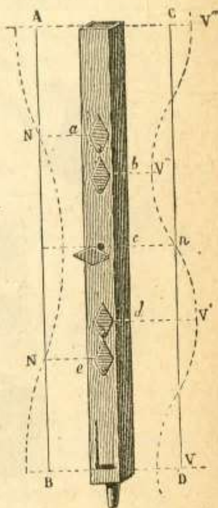


Fig. 179.

Per mettere in evidenza questi nodi e questi ventri, bisogna osservare che nei ventri l'aria vibra ma conserva la stessa densità di quella esterna; mentre il contrario accade nei nodi, dove lo strato d'aria va soggetto a rapide compressioni e rarefazioni. Se dunque si apre un foro sulla parete della canna in corrispondenza a un ventre, il suono non muta; esso muterebbe invece se in quel punto vi fosse un nodo.

Prendiamo una canna come quella della fig. 179, munita di fori chiusi da valvole: regoliamo la velocità della corrente d'aria in modo ch'essa dia la nota fondamentale, e apriamo la valvola di mezzo, ove corrisponde un nodo; il suono sale subito al-

l'ottava, perchè vi si sostituisce un ventre, e la lunghezza dell'onda diviene la metà. Ma se si fosse regolata la corrente di aria in guisa che la canna avesse data l'ottava, il suono, aprendo o chiudendo la valvola di mezzo, non avrebbe subito alcuna variazione.

Per vedere lo stato dell'aria nei nodi e nei ventri,

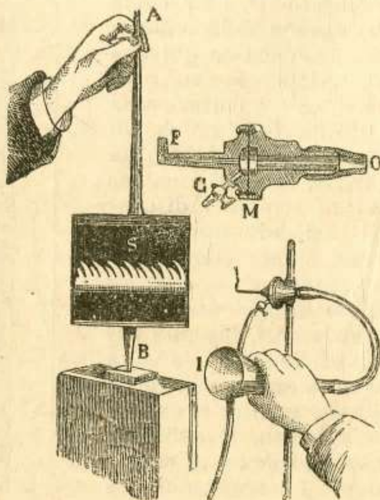


Fig. 180.

si può far uso di un metodo elegante chiamato delle *fiamme manometriche:* si pratichino sulla parete di una canna sonora tre fori, come ora si è detto, uno nel mezzo, e due ad un quarto circa dagli estremi, e si ricopra poi ognuno di essi con una membrana elastica tenuta a posto da una scatola manometrica: il gas d'illuminazione va a bruciare

nel beccuccio di cui ciascuna capsula è fornita. Finchè la canna tace, le tre fiammelle, aventi una conveniente altezza, ardono tranquillamente; ma se si soffia debolmente nella canna in guisa che essa dia il suono fondamentale, la fiammella di mezzo di fronte a un nodo si estingue, mentre le altre due partecipano alla vibrazione dell'aria nelle sezioni ventrali corrispondenti. Se poi si rinforza la corrente d'aria in modo che la canna dia l'ottava, la fiammella di mezzo seguita ad ardere, e si estinguono invece le due estreme.

Per separare l'una dall'altra le varie forme che

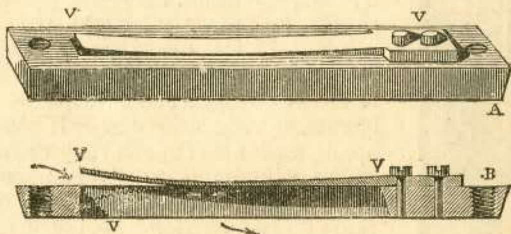


Fig. 181.

prende una fiamma in vibrazione, si può osservarne la imagine in uno specchio girante. Quando la fiamma non vibra, si vede un nastro continuo; invece quando essa vibra si formano delle dentellature come quelle di una sega, piegate un poco nel senso del movimento.

Evidentemente le imagini allungate corrispondono ad aumento di pressione e però a condensazioni; quelle più brevi, al contrario, sono dovute a diminuzione di pressione, e quindi a rarefazioni. La fig. 180 mostra una di tali capsule manometriche isolata, la cui fiammella vibra per effetto di un

suono prodotto dinanzi all'imbuto *I*, e si vedono le sue imagini separate e distinte nello specchio *S* che gira intorno all'asse *A B*.

Oltre i tubi sonori con imboccatura a flauto dei quali si è parlato, vi sono quelli con *imboccatura a linguetta o ad ancia*. Le linguette sono di due specie, *libere* e *battenti*; le linguette libere, come quelle delle fisarmoniche (fig. 181), consistono in molle *V V* che possono liberamente oscillare entro la finestra rettangolare, praticata in una scatola *A*; esse, vibrando, agiscono come la sirena che apre e intercetta periodicamente la via alla corrente d'aria.

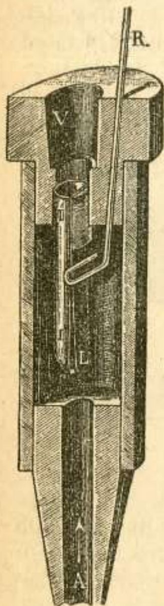


Fig. 182.

Una linguetta battente *L* di cui con la rasiera *R* si regola la parte vibrante, si vede nella fig. 182: essa è applicata contro l'apertura di un mezzo cannello, chiuso in fondo e aperto in cima, ed è fatta vibrare dalla corrente d'aria che viene da *A*. Un tubo che si adatta all'imboccatura *V* serve a rinforzare il suono, il quale in questo caso acquista una tempera aspra, a cagione dei colpi che la linguetta dà contro l'orlo del cannello.

I *registri dell'organo* corrispondono a queste canne di diversa imboccatura, che danno suoni di tempera differente.

Quando la linguetta o ancia di un tubo sonoro è facilmente flessibile, accade che la reazione della colonna d'aria prenda su essa il sopravvento; allora l'ancia non fa le vibrazioni che le sono proprie, ma cedendo alle variazioni di pressione dell'aria,

compie vibrazioni meno rapide, e il suono diventa più grave.

Nelle trombe e negli altri strumenti di ottone sono le labbra del sonatore, appoggiate contro l'imboccatura a imbuto, che fanno da ancie e cedono, aprendosi e chiudendosi alternativamente, alle variazioni di pressione della colonna d'aria. Soffiando sempre più forte, si ottiene con questi strumenti, come con l'imboccatura a flauto, tutta la serie de' suoni armonici; e si allunga e si accorcia la colonna d'aria vibrante, chiudendo con le dita, o con chiavi, dei fori laterali convenientemente disposti.

169. **Interferenza dei suoni : battimenti.** — Non

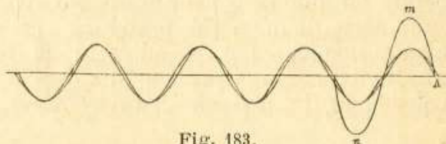


Fig. 183.

possiamo passare sotto silenzio il fenomeno *d'interferenza.*

Supponiamo che lungo un tubo si propaghino nel medesimo verso due serie di onde della stessa lunghezza e ampiezza, e con la medesima velocità, e consideriamo i due casi estremi: o le onde si sovrappongono in concordanza di fase, e allora è evidente che i loro moti si sommano, e ne risulterà un'onda della stessa lunghezza ma di ampiezza doppia come fa vedere la fig. 183, dove le onde componenti sono descritte con tratto continuo e punteggiate; o si sovrapporranno in opposizione di fase, e allora a ciascuna particella del mezzo arrivando contemporaneamente due impulsi eguali e contrari, i moti oscillatori si elideranno (fig. 184). In questo secondo caso propriamente si dice che avviene in-

terferenza delle due serie di onde; e, se esse sono dovute a corpi sonori, si avrà il silenzio.

Non si può realizzare il 2° caso ora detto, adoperando due sorgenti sonore dello stesso periodo, indipendenti; perchè ammettendo pure che in un

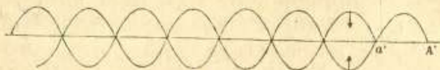


Fig. 184.

dato istante esse facciano le loro oscillazioni in opposizione di fase, non vi si manterranno a lungo, e poco dopo le faranno in concordanza. Ma dividendo in due una serie di onde che prendono origine da una stessa sorgente, e poi facendole di nuovo sovrapporre nella stessa direzione, si riesce con facilità a produrre il fenomeno di interferenza.

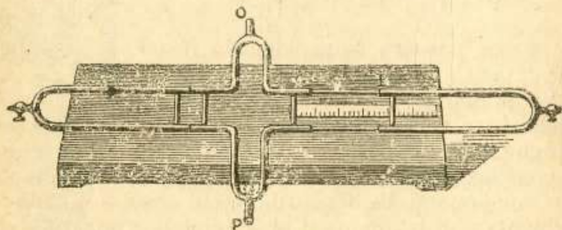


Fig. 185.

Serve bene allo scopo l'apparecchio della fig. 185, ideato dal Quincke; esso è fatto con canne di ottone come quelle delle trombe, e potendo esse in uno de' rami rientrare le une nelle altre, si può variarne, entro certi limiti, la lunghezza. Le onde emesse da un corpo sonoro posto dinanzi ad *O* si

biforcano ne' due rami di sinistra e di destra, e poi tornano a congiungersi nel tubo *P* che prolungasi con altro di gomma. Se i detti due rami hanno la stessa lunghezza, i cammini percorsi dall'onda di destra e da quella di sinistra sono eguali, e si sovrapporranno in *P* in concordanza di fase, come erano all'atto di biforcarsi, e l'orecchio in *P* udrà il suono. Ma se si allunga uno de' rami, in modo che la differenza di cammino sia di un numero dispari di mezze lunghezze d'onda, allora i due moti arriveranno al punto di congiunzione in opposizione di fase, e interferiranno: l'orecchio in *P* non udrà più il suono.

Pertanto due suoni della stessa altezza non faranno che rinforzarsi o indebolirsi costantemente a seconda che si sovrapporranno in concordanza o in opposizione di fase; ma che cosa accadrà quando si produrranno due suoni di altezza poco diversa? Supponiamo, per fissare le idee, che un corpo sonoro eseguisca 100 vibrazioni in un minuto secondo, e l'altro 101: in principio, se cominceranno a oscillare nello stesso istante, le oscillazioni si faranno sensibilmente d'accordo; ma poi si accentuerà la differenza di fase e, scorso mezzo secondo, accadrà che mentre il primo ha compiuto la cinquantesima oscillazione, il secondo avrà fatto la cinquantesima e mezza, ossia i loro moti saranno in opposizione di fase e interferiranno. Di poi continuerà ad aumentare la differenza di fase, e alla fine del secondo i due moti saranno ancora d'accordo. Dovrà dunque verificarsi, ad ogni secondo, un graduale abbassamento e un graduale rinforzo di suono, detto *battimento*. Se i due suoni differissero di due, tre, ecc., vibrazioni al secondo, si produrrebbero nello stesso tempo altrettanti battimenti. Se la differenza sarà piccola, i battimenti saranno

nettamente staccati e si potranno contare sino a cinque o sei per secondo; ma quando la differenza nel numero delle vibrazioni aumenta, i battimenti diventano più fitti e formano una specie di rullio; poi aumentando ancora quella differenza, i battimenti spariscono e resta la *dissonanza*, ossia i due suoni non istanno bene insieme, finchè non si arriva a una differenza tale che l'intervallo fra i due suoni sia *consonante*. Per udire i battimenti di due coristi, se ne prendano due all'unisono, e si modifichi un poco il periodo di uno attaccando al rebbio una piccola moneta, come si è detto innanzi (§ 167): eccitandoli entrambi, si udranno distintamente i battimenti.

170. **Tempera dei suoni; legge di Fourier; analisi dei suoni.** — In generale gli strumenti musicali non emettono un suono semplice come il corista, perchè ogni corpo vibrante si suddivide in tante onde stazionarie quante sono compatibili con la sua forma e col modo di eccitamento; ne segue che il suono degli strumenti musicali (corde, tubi, ecc.) è un suono composto. Vale a dire, la *nota fondamentale* che è quella che determina l'altezza del suono ed è la più intensa, è accompagnata da altre note più alte, ma più deboli, in rapporti assai semplici con la prima, le quali sono dette *note armoniche* o *parziali*. La *tempera* o *metallo* del suono dipende appunto dal numero, dalla qualità e dalla relativa intensità di cosiffatti suoni armonici, che accompagnano il suono fondamentale.

È in armonia con questo le curve d'oscillazione dei diversi corpi sonori ottenute col mezzo di ingegnosi esperimenti, non sono semplici com'è la sinusoide fornita da un corista, ma sono curve periodiche più complesse. L'analisi matematica ha dimostrato poi che tali curve complesse risul-

tano dalla combinazione di più curve pendolari, le cui lunghezze d'onda sono $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3} \ldots\ldots$; per esempio la fig. 186 mostra nel basso la curva ri-

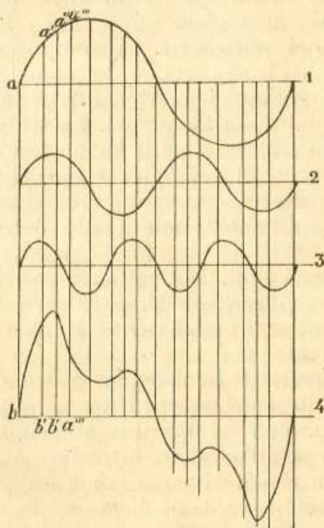


Fig. 186.

sultante di tre curve pendolari, aventi lunghezze $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$. Si comprende bene anche che il risultato è diverso, secondo la fase in cui la sovrapposizione loro succede; si otterrebbero cioè curve risultanti diverse spostando le fasi delle curve componenti. La legge in discorso, detta *legge di Fourier*,

acusticamente esprime appunto il fatto che si è detto, essere cioè un suono composto o musicale non altro che la sovrapposizione di più suoni semplici, di cui il più grave ha lo stesso numero di vibrazioni del suono dato, e gli altri appartengono tutti alla serie armonica.

Le corde del pianoforte battute ad un settimo circa della loro lunghezza, e le canne da organo aperte danno suoni pieni, ricchi, perchè accompagnati dai primi suoni armonici. La tempera acquista una certa asprezza, se il suono fondamentale è accompagnato dagli armonici superiori al settimo; e se cotali armonici sono molto forti, il suono riesce penetrante, squillante, come quello delle campane e delle trombe.

Inoltre hanno influenza sulla tempera le casse di risonanza che vibrano anch'esse, e certi rumori prodotti nell'eccitare l'istrumento i quali accompagnano il suono.

La voce umana è ricchissima di suoni armonici: si sollevino gli smorzatori di un pianoforte e vi si canti dinanzi, con sufficiente intensità, una nota; allora la corda all'unisono, e quelle che ne danno le armoniche risponderanno come un'eco.

Se sulle sezioni ventrali delle corde si saranno disposti dei cavalierini di carta, si vedranno scossi quelli delle corde che oscillano, mentre rimarranno fermi gli altri.

Ma siffatta analisi si compie anche meglio coll'aiuto dei risonatori di Helmholtz: basterà averne una serie bene scelta, che corrisponda cioè alle note armoniche del suono che si vuole studiare; allora, armando l'orecchio successivamente di tali risonatori, se uno dei detti suoni farà parte della nota fondamentale, l'orecchio lo percepirà con notevole intensità.

171. **Potere risolutivo dell'orecchio.** — Ora cade in acconcio di fissare l'attenzione su una meravigliosa facoltà dell'orecchio, che è quella di distinguere un certo suono fra tanti altri che ad esso arrivano contemporaneamente.

L'aria della sala di un teatro è percorsa da una folla di onde, che senza posa si incrociano in ogni verso; sono onde da due a quattro metri quelle dei cantanti, da mezzo metro ad un metro quelle delle cantatrici; ogni nota dell'orchestra, ogni rumore genera le sue onde, e tutte si propagano per sfere intorno alla propria sorgente, si attraversano a vicenda, si riflettono contro le pareti, finchè s'incontrano in nuove onde, e dopo tante vicende si estinguono. È uno spettacolo che l'occhio non può vedere, ma l'orecchio discerne assai bene; tutto si fonde in un moto risultante unico, in un' unica successione di onde condensate e rarefatte sulla membrana del timpano. Ma l'orecchio arriva, volendo, a scomporre quest'onda risultante tanto complicata nelle numerosissime onde componenti, e in mezzo a quel guazzabuglio può distinguere le voci del tenore, della prima donna, ecc., il suono dei vari strumenti, il rumore dei passi, il fruscio degli abiti. E l'analisi che l'orecchio può fare è più sottile, più meravigliosa ancora, perchè, se aiutato, esso può giungere a distinguere le varie note armoniche che accompagnano un dato suono. Ma quale sarà il meccanismo di cui l'orecchio è dotato per compiere tale analisi?

172. **Descrizione dell'orecchio.** — L'orecchio (figura 187) si compone di tre parti, dette rispettivamente: *orecchio esterno, orecchio medio, orecchio interno.* L'orecchio esterno consiste nel *padiglione P*, formato da una membrana cartilaginosa, e nel *condotto auditivo C.* Questo è chiuso nel fondo dalla

membrana circolare del *timpano T*, la cui tensione è regolata da appositi muscoli. Questa membrana è alquanto inclinata sull'asse del condotto auditivo, di guisa che la sua superficie è notevolmente maggiore della sezione retta del condotto in quel punto. Dietro il timpano si trova l'orecchio medio, detto

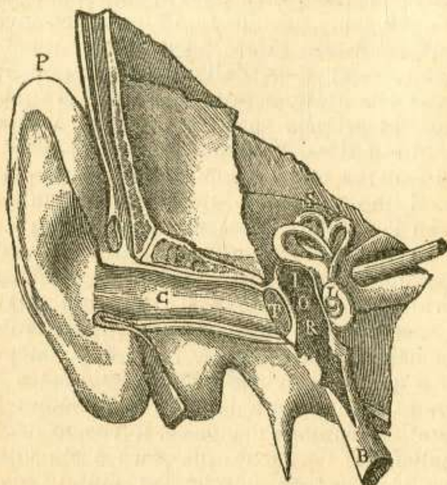


Fig. 187.

anche *cassa del timpano;* è questa una cavità ripiena di aria che ha la stessa densità di quella esterna, perchè la cassa del timpano comunica colla faringe, a livello delle fosse nasali, per mezzo della *tromba di Eustachio B.* Di fronte al timpano sono nell'orecchio medio due altre aperture per le quali si passa nell'orecchio interno; esse sono la *finestra ovale O* e la *finestra rotonda R*, chiuse da

membrane. Una serie di ossicini congiunge la membrana del timpano e la membrana della finestra ovale. La fig. 188 rappresenta questa serie di ossicini: il primo *M* detto il *martello*, da una parte si appoggia sulla membrana del timpano, dall'altra sull'*incudine I* con la quale è articolato; il terzo detto *osso lenticolare L* unisce l'incudine alla *staffa E*, la cui base è impiantata sulla membrana che chiude la finestra ovale.

Dietro la cassa del timpano è l'orecchio interno o *labirinto*, che è la parte più importante dell'organo dell'udito. Esso si trova in una cavità dell'*osso temporale* ripiena di liquido, nel quale nuotano le estremità dei filamenti del *nervo acustico*. Tre cavità particolari compongono l'orecchio interno, le quali sono: il *vestibolo* nel mezzo; i *canali semicircolari* *S* nella parte superiore; e la *coclea L* nella parte inferiore (fig. 187). Tale è, in succinto, la descrizione delle principali parti che costituiscono l'organo dell'udito nell'uomo; ora dobbiamo dire qual sia l'ufficio di ciascuna di esse.



Fig. 188.

Evidentemente il padiglione ha l'ufficio di raccogliere e di riflettere le onde sonore nel condotto auditivo; e per udire meglio i suoni, noi giriamo la testa in modo da porre l'apertura del padiglione nella direzione da cui i suoni ci sembran provenire, ed anche talvolta ingrandiamo artificialmente la superficie riflettente dell'orecchio esterno con il cavo della mano. Il condotto auditivo trasmette, rinforzandole, le vibrazioni sonore alla membrana del timpano; e le vibrazioni di questo, per la serie degli ossicini sopra descritti, sono trasmesse alla

membrana che chiude la finestra ovale, sulla quale si appoggia la staffa. Quest'ultima membrana poi, a sua volta, trasmette le vibrazioni al liquido dell'orecchio interno, il quale può spostarsi in grazia della flessibilità della membrana che chiude la finestra rotonda. Il liquido finalmente comunica le vibrazioni ai nervi.

Notiamo che le ossa della testa e i denti possono trasmettere direttamente all'orecchio interno le vibrazioni sonore; è così che sospendendo una soneria a un filo tenuto fra i denti e turando bene gli orecchi, si ode il suono che per il filo, i denti e le ossa, arriva fino all'orecchio interno.

Quanto alla catena degli ossicini diremo che essa, oltre l'ufficio di trasmettere le vibrazioni all'orecchio interno più facilmente e più intensamente che non lo farebbe un corpo gasoso, servono anche, secondo Savart, a tendere la membrana del timpano e quella della finestra ovale, e a renderle così più sensibili al movimento vibratorio. Quando si ascolta attentamente, i muscoli (fig. 187) che comandano il martello e la staffa entrano in azione, le membrane si tendono ed il suono pare più intenso e distinto.

Si è detto sopra che l'orecchio interno è la parte essenziale dell'organo dell'udito; e difatti è provato dall'esperienza che anche senza la membrana del timpano e la catena degli ossicini si possono udire i suoni, purchè però sia integro l'orecchio interno, e le due finestre ovale e rotonda non siano lacerate; in questo caso il labirinto si vuoterebbe del liquido, e le estremità del nervo disseccandosi perderebbero la loro sensibilità; la sordità allora è assoluta.

Nel vestibolo i nervi terminano in forma di filamenti elastici: nella coclea, e fra le due membrane che la dividono longitudinalmente, le ultime espan-

sioni del nervo acustico formano migliaia di esilissimi microscopici filetti nervosi, disposti a guisa di tastiera, l'insieme de' quali è detto *organo del Corti*, dal nome dello scopritore.

Ora, Helmholtz attribuì a quest'organo la facoltà risolvente dell'orecchio, ammettendo che ciascuna fibrilla sia dotata della proprietà di vibrare con periodo speciale, differente dall'una all'altra; e che quindi ciascuna di esse, a guisa delle corde di un piano da cui si è sollevato lo smorzatore, possa entrare in vibrazione per risonanza se eccitata dalla nota che risponde al proprio periodo: in tale maniera sarebbe analizzata l'onda composta che arriva al labirinto. Ma non basta: nell'organo del Corti verrebbero a vibrare, oltre la fibra che risponde alla nota fondamentale, anche quelle corrispondenti alle note armoniche che accompagnano il suono, mentre le altre intanto starebbero ferme; sembra che l'orecchio possa in tal modo spingere la sua analisi fino a trovare i suoni armonici che accompagnano una data nota.

173. **Fonografo; grammofono.** — Ma noi lasceremo un tale ordine di idee, nel quale temiamo di esserci inoltrati anche troppo, e per chiudere questo discorso de' suoni, descriveremo brevemente il fonografo di Edison, che serve a scrivere e riprodurre i suoni, il quale al primo suo apparire destò il più vivo interesse.

Un cilindro *C* (fig. 189), con una scanalatura di passo eguale a quello della vite *V*, è fatto da questa avanzare continuamente lungo l'asse: cosicchè un punto della superficie descrive l'elica ivi tracciata. Il cilindro si copre di stagnola con cura, cosicchè sulla faccia esterna si disegni il rilievo della scanalatura: indi si affaccia lateralmente al cilindro un tamburello consistente in una imboccatura, in

fondo alla quale è tesa una sottilissima lamina elastica; questa poi comunica le sue vibrazioni ad una puntina portata dalla molla *L* (fig. 190). Si regola la posizione del tamburello così che la punta si appoggi con leggera pressione sulla stagnola nel mezzo della scanalatura, presso l'estremità del cilindro più remota dalla manovella *M*, e la si fissa. Girando il cilindro col mezzo della detta manovella, e mantenendo costante la velocità coll'aiuto del volantino *N*, la punta traccerà un solco tutto eguale secondo la mediana della scanalatura elicoidale. Ma

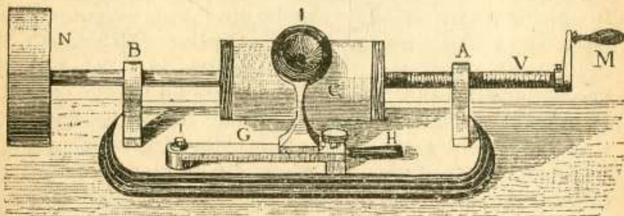


Fig. 189.

se mentre il cilindro ruota, si parla, si suona, si fischia davanti all'imboccatura del tamburello, la sua membrana entrerà in vibrazione obbedendo alle onde condensate e rarefatte, e comunicherà il moto alla punta; questa scaverà ora un solco nella stagnola non più uniforme, ma più o meno profondo in corrispondenza all'ampiezza delle vibrazioni, e quindi alla intensità dei suoni; avrà inoltre delle discontinuità più frequenti, se l'altezza del suono è maggiore; insomma quel solco tutto a trafitture più o meno profonde, più o meno rade, ha per profilo una curva che rappresenta in tutti i caratteri i suoni prodotti dinanzi all'imbuto *I*.

Staccato ora il tamburello dal cilindro, si gira la manovella a rovescio, e si rimettono tamburello e cilindro nella posizione identica che avevano prima che cominciasse il movimento; poi si fa rotare di nuovo il cilindro, procurando che la velocità di rotazione sia quella di prima. La punta guidata dal solco rifarà la sua via; dove si imbatterà in un incavo, si affonderà, e sarà invece sollevata negli intervalli fra un incavo e l'altro; in una parola, essa eseguirà tutti i movimenti di prima, e li comunicherà alla membrana: questa, ripetendo esattamente il moto vibratorio eseguito sotto l'azione delle onde sonore, riprodurrà in modo fedele i suoni, le parole, i rumori in tutte le loro particolarità, salvo s'intende, una minore intensità. Le stagnole possono servire più volte alla ripetizione dei suoni, ma si sciupano ben presto. Edison sostituì loro, con felice pensiero, dei cilindri vuoti fatti con cera particolare; essi si infilano sul cilindro metallico senza scanalature, e leggermente conico. I cilindri di cera, quando hanno servito alla *scrittura* di un discorso, di un pezzo di musica, sono detti *fonogrammi*, e possono servire alla ripetizione de' suoni più volte.

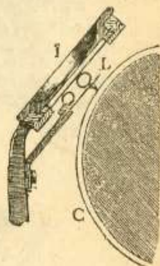


Fig. 190.

Inoltre il movimento non più fatto a mano, ma regolato con un motorino elettrico o con un congegno d'orologeria, e diversi altri perfezionamenti portati alla costruzione dell'istrumento, hanno fatto sì che si oda la ripetizione de' suoni con grande fedeltà.

Il fonografo di Edison è stato, in questi ultimi tempi, felicemente modificato nel *grammofono* (fi-

gura 191). I fonogrammi non consistono più in cilindri di cera che si guastano facilmente, ma in dischi di una sostanza dura, nera come l'ebanite, diversa però da questa, dove le vibrazioni sono *riprodotte* lungo una spirale piatta, restringentesi verso il centro: il disco viene montato su una piat-



Fig. 191.

taforma orizzontale, mossa da un sottoposto congegno di orologeria che si può regolare opportunamente. Una membrana elastica portata da una scatola cilindrica, è fatta vibrare da una piccola punta di ferro colla quale è unita, e un braccio formato da una canna metallica vuota, girevole in un piano orizzontale, porta la scatola suddetta:

questa, a sua volta, non è unita al braccio in modo rigido, ma può rotare intorno ad un asse orizzontale; di guisa che potendosi sollevare ed abbassare segue con la punta tutte le ineguaglianze del disco. Così la membrana riproduce fedelmente le vibrazioni della punta; tali vibrazioni vengono poi rinforzate da un tubo svasato come quello di una tromba, col quale termina il braccio cavo all'altra estremità.

I costruttori non amano far conoscere in che modo si ottenga sul disco la scrittura delle oscillazioni sonore: è probabile però che i suoni, prima scritti da una punta su un disco di cera, siano di poi riprodotti mercè la galvanoplastica sul metallo, e da questo sulla materia del disco quando essa è ancora allo stato pastoso. Qualunque sia l'artificio, la verità è che i vari suoni, le parole, ecc., sono da tale strumento riprodotti con una forza e una fedeltà meravigliose.

CAPITOLO VIII.

Dell' energia termica.

171. **Energia termica**. — Abbiamo detto che l'energia assume in natura due forme diverse, cinetica o di moto, e potenziale o di posizione. Una palla di cannone che si muove con grande velocità, una pietra che cade, una caduta d'acqua, il vento, ecc., sono altrettanti esempi di corpi dotati di energia di moto e atti a fare un lavoro. La neve che copre la cima dei monti, una molla tesa, una arma da fuoco carica, ecc., sono esempi di corpi che possiedono energia potenziale o di posizione.

Per raccogliere un lavoro dall'energia potenziale de' corpi, è necessario ch'essa si trasformi in tutto o in parte in energia di moto.

Negli esempi addotti l'energia è visibile, perchè posseduta da corpi di dimensioni finite: però anche le ultime particelle dei corpi, le molecole e gli atomi, possiedono dell'energia che è cinetica, se dovuta al loro movimento, potenziale se dovuta alle scambievoli loro attrazioni. In questo caso l'energia è invisibile; ed è detta *energia termica* o *calore* quella dovuta al moto delle molecole e degli atomi; coesione o affinità, quella potenziale dovuta all'attrazione fra le molecole o fra gli atomi.

Vedremo in seguito che l'energia posseduta da una massa visibile può trasformarsi in calore, e viceversa; vedremo cioè che il lavoro e il calore possono trasformarsi reciprocamente l'uno nell'altro, e quindi il calore è una forma di energia.

175. **Unità pratica del calore; caloria.** — Qualunque, del resto, sia la natura del calore, è cosa chiara che esso è una quantità suscettiva di misura. Il calore svolto dalla combustione di 2^{gr} di carbone, è evidentemente doppio di quello che si ottiene bruciandone, nelle stesse condizioni, 1^{gr}: così pure è evidente che a scaldare un chilogr. d'acqua da 0° a 1°, si richiederà metà calore che a scaldarne due chilogr. pure da 0° a 1°. Si vede così che, fondandosi su uno o su un altro fenomeno, si può stabilire una unità pratica del calore; e propriamente si è convenuto di assumere come unità, e le si è dato il nome di *caloria, la quantità di calore che si richiede a scaldare da 0° a 1° un chilogrammo d'acqua.* L'unità così definita è la grande caloria; si adotta pure la *piccola caloria*, che è la millesima parte, ed è eguale al calore che bisogna per scaldare da 0° a 1° un gr. di acqua.

Bisogna stabilire la temperatura iniziale della massa d'acqua che si deve riscaldare, perchè a tutto rigore non è la stessa la quantità di calore che occorre per scaldare 1 chilogr. d'acqua di 1° partendo da temperature diverse. A tale riguardo anzi, non vogliamo tralasciare di dire che si propone oggi di definire la caloria come la quantità di calore necessaria a scaldare 1 chilogr. d'acqua da 14° a 15°.

176. **Temperatura dei corpi.** — Abbiamo detto che la temperatura di un corpo è il grado di calore che esso possiede, e si è veduto come possa misurarsi con il termometro a mercurio. Prima però di andare innanzi, sarà bene di precisare le

nostre idee a tale riguardo. Prendiamo due corpi qualunque che indicheremo *A* e *B*, e mettiamoli a intimo contatto il più possibilmente: diremo che i due corpi sono alla stessa temperatura, se non si fanno scambio di calore; e ce ne assicureremo osservando minutamente se non variano i loro volumi. Se, al contrario, uno cede calore all'altro, diremo che hanno temperatura diversa; e precisamente quello che cede calore e diminuisce di volume è il più caldo, e l'altro che ne guadagna e aumenta di volume è il più freddo: ma il passaggio di calore dall'uno all'altro durerà finchè i due corpi, uno raffreddandosi e l'altro riscaldandosi, non abbiano raggiunto una medesima temperatura. Non altrimenti, se si stabilisce la comunicazione fra due vasi comunicanti pieni di uno stesso liquido, questo passerà dal vaso dove il livello è più alto all'altro dove il livello è più basso, finchè il livello non abbia raggiunto la stessa altezza in entrambi. E come il livello finale dipenderà in tal caso dai livelli primitivi e dalle capacità dei vasi, così la temperatura finale dipenderà dalle temperature iniziali e dalle capacità termiche dei corpi messi a contatto. Avendosi poi tre corpi, diremo che ha una temperatura intermedia quello che riceve calore da uno e ne cede invece all'altro. — È chiaro pertanto che avendosi molti corpi, per disporli in ordine di temperature decrescenti, bisognerebbe, seguendo il metodo indicato, metterli a intimo contatto l'uno con l'altro, e notare a volta a volta i volumi. Ma l'operazione riescirebbe praticamente assai difficile pel gran numero di contatti che bisognerebbe stabilire, e inoltre sarebbe estremamente difficile misurare con esattezza volta per volta le variazioni di volume: oltre a ciò, vi sono de' corpi, per esempio l'acqua fra 0° e 4°, che quando sono riscaldati,

invece di dilatarsi, si contraggono. Si evitano tante difficoltà ricorrendo a un corpo solo che serva di paragone, e soddisfi alla condizione di dilatarsi ogni volta che si riscaldi, e in conseguenza di contrarsi ogni volta che si raffreddi. Questo corpo portato a contatto intimo con i corpi della natura, dietro il volume che assumerà, ci indicherà se un corpo è più caldo o più freddo di un altro. Così, per esempio, se messo a contatto del corpo *A* assumerà, quando si è raggiunto l'equilibrio di temperatura, un volume finale maggiore di quello che prende a contatto del corpo *B*, diremo che *A* è più caldo di *B*. E se inoltre avremo cura di dare a questo corpo campione una forma tale da poterne, nei varii casi, misurare con esattezza e agevolmente le variazioni di volume, cosicchè si possa determinare quanto siano fra loro differenti le temperature de' diversi corpi, avremo costrutto un termometro.

Concludendo, diremo che la temperatura di un corpo è quello stato suo particolare, pel quale, posto a contatto degli altri corpi, può cedere ad essi o riceverne calore; e il termometro è l'istrumento che serve a misurare le varie temperature de' corpi.

177. **Pregi di un termometro.** — Si è detto innanzi come si costruisce e si gradua un termometro a mercurio. Vien preferito il mercurio come corpo termometrico, perchè si è provato che le sue dilatazioni sono regolari, vale a dire risultano sensibilmente proporzionali alle quantità di calore che riceve; inoltre il mercurio non solidifica che alla temperatura di — 39°, e bolle a 358°, cosicchè può servire a misurare le temperature fra limiti abbastanza estesi. Ma insieme con il mercurio si dilata anche il vetro; e le varie specie di vetri hanno una diversa legge di dilatazione, onde può accadere che due termometri a mercurio, nel mentre segnano 0°

nel ghiaccio fondente e 100° nel vapore dell'acqua bollente, non vadano poi d'accordo nell'indicare le temperature intermedie. E siccome importa grandemente usare termometri a mercurio fra loro concordi, sarà bene di provvederli da una fabbrica rinomata: ottimi sono i termometri costrutti con il *vetro normale* di Jena.

Quanto si è detto sulla graduazione di un termometro (§ 12), può servire a riconoscere se esso è giusto: circondandone il bulbo e parte del cannello con ghiaccio triturato o con neve che si fonda, esso deve segnar *zero;* e segnar 100° esponendolo nel recipiente della fig. 5 al vapore che si solleva dall'acqua bollente sotto la pressione normale della atmosfera (76^{cm} di mercurio): se l'altezza barometrica fosse alquanto diversa, il termometro segnerebbe più o meno di 100° (v. tav. di Regnault della tensione del vapore d'acqua). Ripetiamo qui quanto dicemmo al § 12, che cioè nel ghiaccio fondente la colonnina del mercurio spesso si ferma un po' sopra lo zero; ciò proviene dal fatto che il bulbo di molti termometri va con il tempo diminuendo di capacità, e quindi il termometro tende a dare indicazioni un po' maggiori. Lo spostamento può arrivare a 1°; ma se si ha cura di aspettare qualche mese fra la costruzione e la graduazione, l'errore arriva tutt'al più a 0°,2. È chiaro che verificandosi tale spostamento, per avere la temperatura giusta basterà sottrarlo dalla indicazione del termometro se si tratta di temperature positive, e aggiungerlo invece se si tratta di temperature negative.

Oltre d'esser giusto, il termometro deve essere *pronto* e *sensibile*. È pronto quando richiede poco tempo per mettersi in equilibrio di temperatura con il corpo col quale si pone in contatto; a tal uopo dovrà avere piccola massa e il bulbo di estesa su-

perficie: così è preferibile sotto questo riguardo, un termometro col bulbo cilindrico a un altro col bulbo sferico. È sensibile quando serve a registrare anche piccole differenze di temperatura, per esempio decimi di grado; a tal fine deve avere il bulbo molto capace relativamente al cannello.

178. **Cautele nell'uso del termometro.** — Scelto il termometro che abbia, a seconda dei casi, la voluta prontezza e sensibilità, per misurare la temperatura di un corpo bisogna aver cura di porlo a intimo contatto con esso; e se si tratta di un fluido, affondarvi oltre il bulbo anche parte del cannello, e aspettare sempre che il filetto di mercurio abbia finito di salire o di scendere. È bene sapere che esponendo un termometro per lungo tempo a temperature elevate, col raffreddamento il bulbo poi non riprende esattamente lo stesso volume, ma resta alquanto dilatato; e se si rimette l'istrumento nel ghiaccio fondente, non segna più 0°, ma qualche decimo meno: anche di questa circostanza bisogna tener conto, se occorre.

Il termometro va pure protetto da forti cambiamenti di pressione che fanno mutare la capacità del bulbo. Sotto la campana della macchina pneumatica segnerebbe meno, e nelle profondità del mare più del giusto, se non lo si proteggesse con una camicia di vetro.

È importante finalmente di notare che, sebbene il mercurio si solidifichi a — 39° e bolla a 358°, le indicazioni d'un termometro a mercurio son giuste soltanto fra limiti più ristretti, fra — 20° e 250° circa: se lo si vuole adoperare per la misura di temperature più basse o più alte, le sue indicazioni devono subire correzioni notevoli, perchè la dilatazione del mercurio non è più regolare. I fisici, in tali condizioni, ricorrono o al termometro ad aria o a quello

con idrogeno che serve a tutte le temperature; e volendo servirsi del termometro a mercurio, stabiliscono prima le correzioni confrontandolo con il termometro a gas. Ci duole di non potere, a tale riguardo, entrare in maggiori particolari.

179. **Termometri di uso speciale.** — Quando un termometro deve esser molto sensibile, vale a dire quando la divisione corrispondente a 1° è piuttosto lunga, e nello stesso tempo deve servire a misurare temperature elevate, la lunghezza del tubo diventerebbe troppo grande, se si volesse tracciare tutta la scala a partire da 0°. Per ovviare a tale inconveniente, si ricorre all'artificio di raccorciare il cannello e di tracciare soltanto le divisioni corrispondenti alle temperature comprese fra i limiti che occorrono. Il meglio sarebbe poter disporre di una serie di termometri, ne' quali sia suddivisa la intiera scala: allora si esplora prima la temperatura da valutare con un termometro poco sensibile, e poi, per avere indicazioni precise, si sceglie nella serie quello che conviene.



Fig. 192.

Il termometro che si usa in *ipsometria* per la misura della temperatura di ebollizione dell'acqua a grandi altezze, è rappresentato dalla fig. 192: sulla sua scala è segnato il punto 0°; viene in seguito un rigonfiamento a forma di olivetta che si riempie di mercurio a una temperatura di circa 80°, dopo di che la scala si prolunga fino a 105°, e ogni grado è diviso in decimi. Il termometro usato in *calorimetria* (metodo delle mescolanze), serve a misurare temperature comprese per lo più fra 15° e 25°. Sulla sua scala sono

segnate le temperature vicine a 0°, poi viene un rigonfiamento, indi sono tracciate le divisioni da circa 10° a 25° per lo più in cinquantesimi di grado.

Questi esempi basteranno a dare un'idea sufficiente di tali termometri.

E sarà bene di dire anche che si può estendere l'uso del termometro a mercurio oltre il punto di ebollizione di tal liquido, riempiendo la cannina dell'istrumento sopra alla colonna liquida con dell'azoto: succede così che, mano a mano che il liquido si dilata, l'azoto è compresso sempre più, e il punto di ebollizione del mercurio si eleva. Simili termometri sono usati più specialmente nelle industrie; e si intende che essi debbano essere costrutti con tubi di vetro ben resistenti, e che bisogna prendere le debite cautele contro i possibili scoppi.

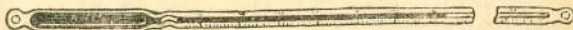


Fig. 193.

180. **Termometri a massima e a minima.** — In molti casi occorre conoscere la temperatura più elevata o quella più bassa, che si verifica in un corpo durante un certo tempo: servono a tale scopo i *termometri a massima e minima*. Ve ne sono di tante specie; però il termometro a massima più semplice è quello rappresentato dalla fig. 193: esso è a mercurio, è disposto quasi orizzontalmente col bulbo alquanto più basso, ed ha il cannello un po' curvato e strozzato vicino al bulbo. Con tale artificio il mercurio può dilatarsi liberamente, ma non tornare indietro nella contrazione; il filetto di mercurio del cannello si stacca in tal caso dalla rimanente massa, e resta a indicare la massima temperatura raggiunta. Raddrizzando il termometro e

dandogli piccole scosse, il mercurio scende e si riunisce a quello del bulbo.

Il termometro a *minima* fig. 194, orizzontale anche esso, contiene alcool, nel quale è tutto immerso un piccolo indice di smalto. Quando si dilata, l'alcool

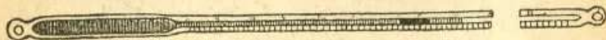


Fig. 194.

lascia quest'indice al suo posto; ma nel contrarsi, il menisco lo tira indietro verso il bulbo, dove poi resta. Per metterlo a segno, bisognerà inclinare il termometro, e far scendere l'indice sino a che venga in contatto col menisco dell'alcool.

181. **Termostati.** — Si chiamano *termoregolatori* o *termostati* degli apparecchi adatti a mantenere, anche per un periodo di tempo molto lungo, una temperatura costante in un mezzo dato, ordinariamente in un liquido. Di termostati se ne sono costruiti di diversissime specie, basati su differenti principii; noi ci limiteremo a descriverne uno, usato a regolare l'arrivo del gas illuminante ad un beccuccio, che serve a riscaldare il mezzo nel quale si vuol mantenere una temperatura possibilmente costante.

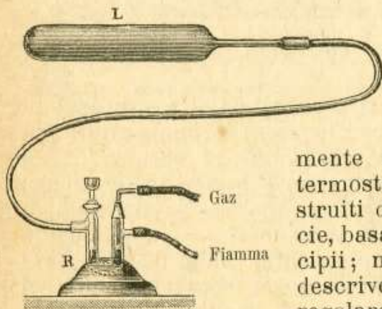


Fig. 195.

La fig. 195 indica lo schema dell'apparecchio: nel mezzo da riscaldare, ad esempio un vaso d'acqua

sotto il quale è disposto un becco a gas, si trova un serbatoio *L* pieno d'aria che comunica col tubo *R* piegato ad U; questo, nella parte inferiore, contiene del mercurio sino ad un certo livello.

Il gas che va ad alimentare la fiamma entra nel tubo *R* per un piccolo foro situato superiormente alla superficie del mercurio: quando la temperatura del mezzo supera quella voluta, l'aria del serbatoio *L* si dilata, e fa salire il mercurio nel ramo di destra del tubo *R* fino a coprire l'apertura di arrivo del gas, il cui afflusso alla fiamma resta perciò interrotto.

Affinchè però la fiamma non si spenga, la si alimenta ancora mediante un altro tubo munito d'un rubinetto aperto di pochissimo. Quando poi il mezzo si raffredda e la temperatura ritorna ad essere quella voluta, il mercurio ridiscende nel ramo di destra del tubo *R*, e scopre nuovamente il foro inferiore pel quale il gas riprende la sua via alla fiamma.

182. **Calore specifico; calorimetro.** — Si chiama *calore specifico* di un corpo la quantità di calore necessaria a scaldare di 1 grado la sua unità di massa; per unità di massa si prende ordinariamente quella di 1 chilogr. Il calore specifico dell'acqua è preso come *uno*, e coincide con la caloria che abbiamo definita innanzi (§ 175).

Il calore specifico varia, come il peso specifico, da un corpo all'altro; e per lo stesso corpo dipende dallo stato fisico; esso varia pure alquanto con la temperatura, ma le sue variazioni sono nel maggior numero dei casi molto piccole e trascurabili nella pratica, e noi in ciò che segue lo supporremo costante.

L'acqua ha un calore specifico ben notevole; talchè, per essere scaldata di 1 grado, richiede mag-

gior calore che ogni altra sostanza solida o liquida, sempre a pesi eguali.

Per convincerci del grande calore specifico dell'acqua, prendiamo 200 grammi di mercurio e scaldiamoli a 100°; indi mescoliamoli entro un sottile vaso di vetro con 100 grammi d'acqua all'ordinaria temperatura, che supporremo essere di 20°. Con un buon termometro determiniamo la temperatura dell'acqua prima e dopo della mescolanza; troveremo quest'ultima temperatura di circa 25°, cioè di appena 5° superiore alla precedente, per effetto del calore comunicato dal mercurio all'acqua, sebbene la massa del mercurio sia doppia di quella dell'acqua, e si sia raffreddata di 75°.

Il fatto ora esposto del richiedersi quantità differenti di calore per produrre lo stesso scaldamento di pesi eguali di sostanze diverse, è di grande interesse nella scienza e nella pratica: intanto è chiaro che il calore specifico, come il peso specifico, è un carattere che può servire a riconoscere le varie sostanze.

Quando si conosce il calore specifico di un corpo, possiamo subito calcolare quanto calore occorrerà spendere per scaldarne una data massa di un certo numero di gradi: p. es., essendo il calore specifico del ferro eguale a 0,11 calorie, volendo scaldare 10 chilogrammi di ferro da 0° a 100°, occorreranno $10 \times 100 \times 0{,}11 = 110$ calorie.

In generale, dicendo m la massa in chilogrammi di un corpo, c il suo calore specifico, per riscaldarla dalla temperatura t alla temperatura θ si richiederà un numero di calorie:

$$Q = m \, . \, c \, (\theta - t).$$

Il calore specifico dei corpi si determina col *calorimetro*. Uno dei più usati è il calorimetro ad acqua:

consiste in un vaso metallico (fig. 196) sottile, della capacità di mezzo litro circa; le sue pareti sono speculari per diminuire la perdita di calore per irraggiamento, ed è sostenuto da tre piedi di sughero per diminuire le perdite per conduzione. Esso è posto entro un altro vaso avente le pareti più spesse e parimenti speculari, allo scopo di riflettere

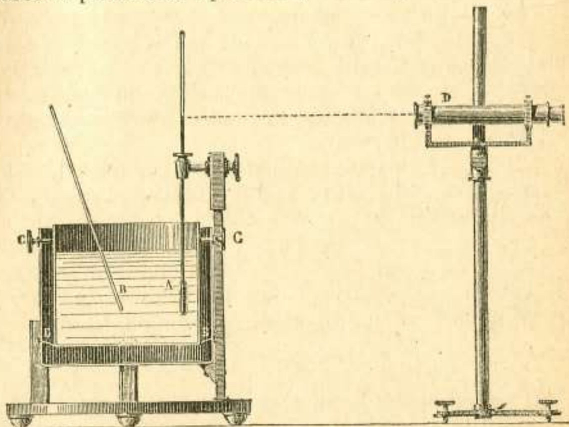


Fig. 196.

verso il primo il calore che ne riceve durante l'operazione, e difenderlo dalle radiazioni de' corpi esterni. Un termometro *A* pronto e sensibile segna la temperatura dell'acqua contenuta nel vaso interno, ed un agitatore *B* ha l'ufficio di mantenerla uniforme in tutta la massa. Si legge la temperatura col mezzo di un cannocchiale *D*.

Prima di servirsi dell'apparecchio, occorre determinarne l'equivalente in acqua. Si definisce *equivalente in acqua* di un dato corpo o d'un sistema di

corpi quel peso di acqua che abbisogna della stessa quantità di calore per scaldarsi dello stesso numero di gradi.

Quando il corpo da sperimentare si pone nell'acqua del calorimetro, una certa quantità di calore viene assorbita dal termometro, dall'agitatore e dal vaso metallico: per determinare l'equivalente in acqua di tutti i corpi assieme, si procede nella maniera seguente. Sia p il peso dell'acqua contenuta nel calorimetro alla temperatura ambiente t; versiamoci un peso p' di acqua alla temperatura superiore T, e agitiamo la massa, affinchè assuma uniforme temperatura.

Dicendo θ la temperatura massima cui giunge il termometro, il calore ceduto dall'acqua calda al calorimetro sarà:

$$p' \, (T - \theta);$$

il calore poi assorbito da quest'ultimo, se con a si chiama il suo equivalente in acqua, sarà:

$$(a + p) \, (\theta - t).$$

Il calore ceduto dall'acqua calda, se si trascurano le perdite inevitabili per conduzione e irraggiamento, sarà evidentemente eguale a quello acquistato dall'acqua fredda dal termometro, dal vaso calorimetrico; cosicchè sarà:

$$p' \, (T - \theta) = (a + p) \, (\theta - t)$$

equazione che permette di ricavare a.

Ciò posto, se P è il peso, e c il calore specifico del corpo che alla temperatura T si pone nel calorimetro, con gli stessi ragionamenti ora fatti si giunge alla equazione:

$$c \, P \, (T - \theta) = (a + p) \, (\theta - t)$$

da cui

$$c = \frac{(a+p)(\theta - t)}{P(T-\theta)}.$$

Per rendere spedita l'operazione, ed eliminare il più possibile le cause di errore, Regnault ha dato all'apparecchio una speciale conformazione su cui non possiamo intrattenerci; ci limitiamo solo ad avvertire che una causa grave di errore deriva dallo scambio di calore tra il calorimetro e l'ambiente; essa però può essere per buona parte eliminata se il corpo è buon conduttore ed ha grande superficie, in maniera da porsi subito (2 o 3 minuti circa) in equilibrio di temperatura con l'acqua del calorimetro.

In ogni caso la temperatura finale θ non deve eccedere che di pochi gradi quella dell'ambiente, affinchè l'irradiazione sia minima; per compensare questa perdita si consiglia di prendere l'acqua del calorimetro ad una temperatura t inferiore di pochi gradi alla temperatura ambiente, tanto che quest'ultimo irraggerà del calore all'apparecchio in modo da compensarne la perdita.

Diamo qui sotto una tavola dei calori specifici medii di alcuni corpi: si è preso come unità il calore specifico dell'acqua, e i dati sono dovuti a diversi esperimentatori:

Acciaio dolce . . .	0,1165	Ferro	0,1098
» temperato .	0,1175	Jodio	0,0541
Alcool	0,605	Magnesio	0,2519
Antimonio	0,0495	Manganese	0,1217
Argento	0,0563	Mercurio	0,0330
Bismuto	0,0298	Nichel.	0,1090
Calcio	0,1704	Oro	0,0316
Carbone di legna .	0,1935	Platino	0,0322
Cobalto.	0,1067	Piombo	0,0309
Rame	0,0932	Solfo	0,1844
Diamante	0,1532	Zinco	0,0929
Stagno	0,0556		

183. **Legge di Dulong e Petit.** — Dulong e Petit trovarono una legge secondo la quale *il prodotto del calore specifico pel peso atomico dei vari elementi (allo stato solido), ossia il calore atomico, è costante.* Questa legge è soltanto approssimata, giacchè tale prodotto varia alquanto: esso oscilla intorno al valore medio 6,4; vi sono però alcuni elementi, e fra essi il carbonio, i quali se ne scostano sensibilmente. Tuttavia, se si riflette che il calore specifico dipende dalla temperatura e dallo stato molecolare, si può ritenere con sufficiente approssimazione che per i primi elementi il calore atomico è costante. — Il Weber trovò poi che, a temperature elevatissime, anche gli altri elementi a cui appartiene il carbonio, rientrano nella legge: ciò dipende probabilmente dai fenomeni di allotropia che essi presentano.

184. **Calore specifico dei gas.** — Pei gas bisogna distinguere il *calore specifico a pressione costante dal calore specifico a volume costante;* a seconda cioè che si permette alla massa riscaldata di dilatarsi, ovvero la si costringe con un aumento di pressione a conservare lo stesso volume. Il calore specifico a pressione costante è, per ogni gas, maggiore di quello a volume costante, perchè il gas, dilatandosi, spende parte del calore che gli si fornisce nel lavoro d'espansione: il calore specifico a pressione costante dell'aria è 0,237, quello dell'idrogeno 3,409. L'idrogeno ha un calore specifico ben maggiore di quello di tutti gli altri corpi.

185. **Propagazione del calore.** — Passiamo ora ad altra parte del nostro argomento, e consideriamo la trasmissione del calore.

Un corpo caldo cede calore non solo ai corpi più freddi posti a contatto con esso, ma anche a quelli che lo circondano, a una certa distanza; cotesta

trasmissione del calore dai corpi caldi ai corpi freddi può dunque farsi in diversi modi, secondo le circostanze.

Ad esempio, poniamo nel fuoco l'estremo di una verga di ferro: il calore del fuoco passerà nella verga pei punti di contatto, e di poi gradualmente lungo essa, sino all'altro estremo più lontano; cosicchè, se la verga non è nè troppo lunga nè troppo sottile, si scalda anche nelle parti più lontane in modo da non poterla più toccare. Tale passaggio lento del calore lungo la verga, di sezione in sezione, è detto *conduzione del calore.*

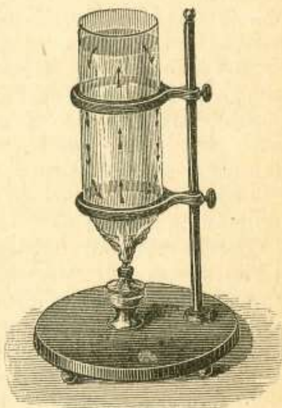


Fig. 197.

Prendiamo ora un vaso pieno per circa due terzi di acqua, e poniamovi al disotto una lampada (fig. 197): stavolta il calore si propagherà a tutta la massa liquida in modo diverso che nella verga di ferro considerata dianzi. L'acqua che sta al fondo, scaldandosi, diventa più leggiera, e ascende verso la sommità, mentre altra acqua più fredda e quindi più densa la rimpiazza; avremo così un continuo moto di masse calde ascendenti e di masse fredde discendenti; ed intanto tutta l'acqua andrà scaldandosi a poco a poco sino all'ebollizione. Questo processo è detto *trasporto* o *convezione del calore.*

In nessuno di questi modi però il calore del

sole può giungere sino a noi. Poichè tanto nella conduzione, quanto nella convezione, la trasmissione del calore avviene per mezzo delle particelle di un solido o di un fluido; e noi abbiamo ragione di credere che non sianvi di siffatte particelle per tutto lo spazio che corre tra noi ed il sole. E se riflettiamo che la luce e il calore del sole impiegano appena otto minuti circa per venire a noi, e che il sole è ad una distanza media di circa 150 milioni di chilometri, ci persuadiamo subito che il calore solare, muovendosi con tale immensa velocità, non potrebbe esserci condotto da particelle trasferentisi dal sole a noi, e neppure da una materia ponderabile interposta. D'altra parte non mancano esperienze dirette, le quali provano che il calore, come la luce, attraversa gli spazi vuoti di ogni materia pesante.

Questo modo di propagazione identico a quello della luce si spiega ammettendo che il moto delle molecole e degli atomi di un corpo, cagione del suo calore, si comunichi ad una sostanza estremamente sottile e immensamente elastica che riempie tutto lo spazio, detta *etere cosmico*, nella quale l'energia si propaga sotto forma di onde. Tali onde propagantisi con la enorme velocità di 300 milioni di metri al secondo possono, se incontrano altri corpi, cedere loro la energia propria in tutto o in parte. Avviene pertanto che quando due corpi si trovano in presenza, entrambi irraggiano energia, cedono cioè la loro energia all'etere, ma nello stesso tempo entrambi ne ricevono: in tali scambi si riscalderà quello dei due pel quale il guadagno supera la perdita. Questo terzo modo di propagarsi del calore è detto *irraggiamento* o *radiazione*.

Abbiamo così tre modi diversi di propagazione del calore; cioè *conduzione*, *convezione* e *radiazione*.

Consideriamo ora più in particolare i primi due modi; dell'altro ci intratterremo nell'Ottica.

186. **Conduzione del calore.** — Poco sopra dicemmo che una verga di ferro avente un estremo nel fuoco si scalda sino all'altro capo, così da non poterla tenere nelle mani, a meno che non sia molto lunga. Allo stesso modo si comportano verghe di argento, di rame, di ottone, ecc., in generale i metalli. Ma se invece di un'asta di ferro, si pone similmente nel fuoco l'estremità di una verga di legno, di vetro o di terra cotta, di eguale lunghezza, l'altro estrèmo non diventerà molto caldo, perchè il legno, il vetro e le terraglie non conducono così facilmente il calore come i metalli.

Anche i peli e le penne sono sostanze che mal conducono il calore, e appunto di tali sostanze vennero provvisti da natura, a forma di vestimenta, moltissimi animali. La temperatura del nostro corpo è in generale superiore a quella dei corpi che ci circondano: essa, nello stato di salute, si mantiene intorno ai 37°; nella fredda stagione quindi, a impedire una rapida dispersione di calore, conviene indossare vesti di lana o pelliccie. Similmente, volendo conservare il calore di un dato spazio, bisogna cingerlo di materia non conduttrice.

Un corpo cattivo conduttore serve non solo a conservare il calore di un altro, ma ancora a preservarlo dal calore dei corpi vicini. Così, adoperiamo la flanella non solo per impedire il raffreddamento del nostro corpo, ma anche per rivestirne un pezzo di ghiaccio che vogliamo sottrarre all'azione del calore dell'ambiente. Le carni, le uova, ecc. si conservano d'estate in luoghi mantenuti freddi, le cui pareti rivestite di sughero, di legno, sono coibenti pel calore, e impediscono che il calore esterno si propaghi all'interno.

I metalli conducono tutti bene il calore; tuttavia il loro *potere conduttivo* varia dall'uno all'altro. È facile persuadersene: ecco, per esempio, due aste,

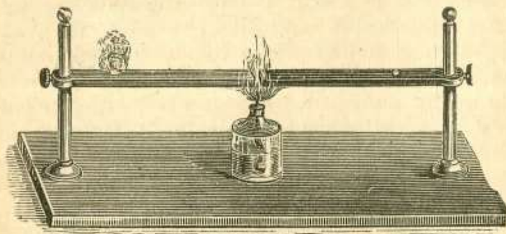


Fig. 198.

l'una di rame e l'altra di ferro, i cui capi da una banda sono molto vicini, e vengono insieme scaldati da una lampada (fig. 198). Se porremo due capocchie di fiammifero, una sulla spranga di rame, l'al-

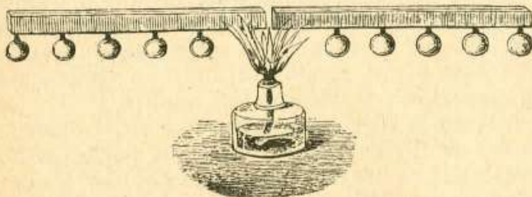


Fig. 199.

tra su quella di ferro, entrambe a una medesima distanza dall'estremo riscaldato, la prima s' accenderà da sè quasi subito, l'altra invece, o non prenderà fuoco, oppure tarderà di molto; il che ci mostra che il calore della lampada vien condotto

più facilmente lungo il rame che non lungo il ferro. Ma questa espertenza non consente molta precisione; meglio è operare in quest'altro modo. Attacchiamo alle suddette aste con un po' di cera delle palline equidistanti (fig. 199): si vedrà staccarsi dal rame un maggior numero di esse, la qual cosa sta a provare che la temperatura della fusione della cera arriva più lontana in questo metallo che nell'altro; il rame è dunque più conduttore del ferro.

Per vedere a un tempo il contegno di vari metalli, se ne prendono delle verghette tutte eguali e coperte di cera; indi si fanno passare i loro capi attraverso ad alcuni fori praticati nella parete di

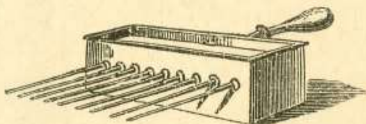


Fig. 200.

una cassetta di ottone che si riempie di acqua bollente (fig. 200), e si osserva sino a quali distanze dalla parete proceda nelle varie verghette la fusione della cera; le conduttività relative stanno fra loro come i quadrati delle lunghezze suddette. Ecco le conduttività di alcuni corpi relative a quella dell'argento presa come 100, secondo i dati di Wiedemann e Franz, che al riguardo usarono metodi esatti e fecero esperienze di grande precisione:

Argento	Rame	Oro	Zinco	Stagno	Ferro	Piombo
100	73,6	53,2	19,0	14,5	11,9	8,5

Platino	Argentana	Bismuto
8,4	6,3	1,8

Quando si sperimenta come indica la fig. 200, bisogna aspettare che la fusione abbia cessato di progredire su tutti i metalli, e non guardare alla sola rapidità del riscaldamento che dipende dal vario loro calore specifico. La sensazione più o meno intensa di freddo che si prova toccando varii oggetti alla medesima temperatura, di-

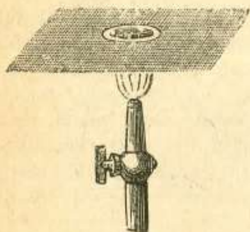


Fig. 201.

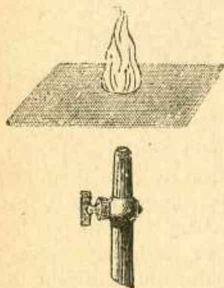


Fig. 202.

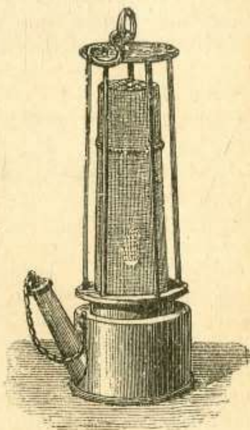


Fig. 203.

pende dalla varia conduttività, ma anche dalla diversa rapidità con la quale essi propagano il calore. Però sempre i buoni conduttori, come i metalli, il marmo, ecc., ci parranno più freddi dei cattivi, come per es. il legno. Se si fascia strettamente di carta un cilindro mezzo di metallo e mezzo di le-

gno, e si espone il tutto al fuoco, si vede la carta abbronzire dove copre il legno, e rimanere quasi intatta dove copre il metallo.

Ponendo una reticella metallica sopra un getto di gas illuminante, si vedrà la fiamma, come mostrano le figg. 201 e 202, a seconda che si accenda il getto sotto o sopra la reticella: questa, conducendo bene il calore, impedisce che il resto del getto arrivi alla temperatura di accensione.

Ne fu fatta una provvida applicazione alla *lampada di sicurezza* dei minatori (fig. 203), immaginata da Onofrio Davy a evitare i grandi danni delle esplosioni delle miscele tonanti, che si formano spontaneamente nelle miniere di carbon fossile.

187. **Legge delle temperature lungo una sbarra scaldata a una estremità.** — Quando si scalda una verga ad un capo (fig. 204), il calore vi si propaga lentamente di sezione in sezione, mentre una parte si perde al contorno per irraggiamento e convezione del gas che la circonda. Quando le temperature delle varie sezioni sono stazionarie, quando cioè si è raggiunto il regime, se si considerano sezioni le cui distanze dall'estremo crescono in progressione aritmetica, si trova che gli eccessi delle loro temperature su quella dell'ambiente decrescono in ragione geometrica.

188. **Convezione del calore nei liquidi e nei gas.** — Sia una piccola botte piena di acqua, chiusa in cima da una scatola metallica a contatto del liquido, nella quale si faccia continuamente circolare acqua calda per mezzo de' tubi *C A* di ammissione e *D E* di scarico, come mostra la fig. 205. Si trova che il calore si propaga con estrema lentezza attraverso il liquido, cosicchè a pochi centimetri di profondità l'aumento di temperatura sarà appena sensibile; la qual cosa prova che l'acqua

— e così fanno in generale gli altri liquidi, se si eccettua il mercurio — conduce male il calore. Ma se invece di scaldare un vaso d'acqua dall'alto, lo scalderemo nel fondo, sappiamo che si porta presto l'acqua all'ebollizione. Infatti, come abbiamo osservato poco sopra, le parti calde e meno dense si innalzeranno e saranno surrogate da quelle fredde e

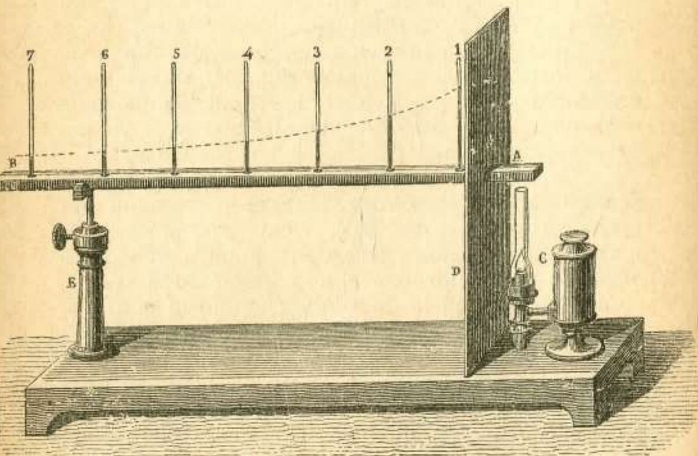


Fig. 204.

più dense, cosicchè avremo una circolazione continua come lo indicano le freccie segnate nella figura 197: essa è dovuta ad una corrente di acqua calda ascendente nel mezzo del vaso, e a correnti di acqua fredda discendenti in prossimità delle pareti. Per osservar bene questi moti prodotti dal calore si può mettere nel recipiente un po' di segatura di quercia.

La convezione termica dell'acqua viene utilizzata nei termosifoni che servono a scaldare gli appartamenti.

La natura ci offre parecchi esempi di convezione: ad esempio, in un lago che si raffredda per causa di rigida stagione, le parti superficiali sono le prime

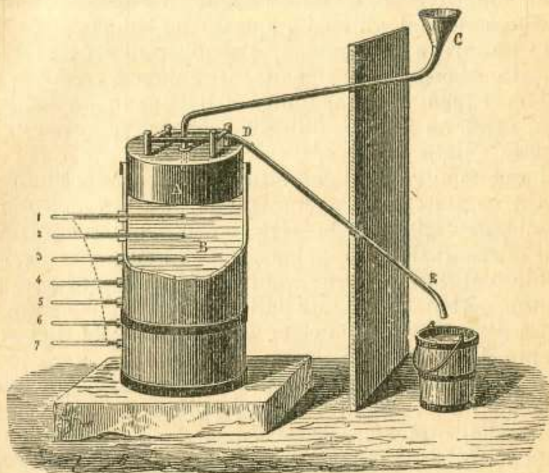


Fig. 205.

a raffreddarsi, e divenendo più pesanti scenderanno; esse poi saranno sostituite da parti più calde e meno dense provenienti dal fondo; cosicchè, in un certo lasso di tempo, tutta quella massa di acqua andrà raffreddandosi sino alla temperatura di 4° al di sopra dello zero, perchè l'acqua ha un massimo di densità a questa temperatura (§ 203): vale a dire un dato volume di acqua a 4° pesa più di ogni altro

egual volume d'acqua a temperatura maggiore o minore.

Raggiunta pertanto la temperatura di 4°, l'acqua, se il raffreddamento continua, diviene più leggiera e quindi rimane alla superficie; cosicchè, se si raggiunga la temperatura di 0°, lo stagno ghiaccerà alla superficie. E poichè l'acqua si espande nella formazione del ghiaccio, questo ha un peso specifico minore, e galleggia. Se l'acqua non presentasse questo massimo di densità, il ghiaccio comincerebbe a formarsi nel fondo, e il lago in un tempo più o meno lungo finirebbe per diventare una massa gelata.

I gas conducono il calore anche peggio dei liquidi; ma a cagione dell'estrema mobilità delle loro molecole, si verificano in essi con lo scaldamento facili correnti di convezione, a quel modo che l'aria calda del fuoco d'un camino s'innalza su per la canna, e viene surrogata dall'aria fredda circostante.

La stessa cosa succede, su ampia scala, nel sistema dei venti. Da quella regione della terra che dicesi zona equatoriale, dove il sole dardeggia più cocenti i suoi raggi, l'aria scaldata si leva verso l'alto dell'atmosfera; quest'aria è allora rimpiazzata da altra fredda e greve che scorre lungo la superficie del globo, proveniente dalle gelide regioni polari. Si verifica così all'equatore un sistema di correnti ascendenti che trasportano l'aria calda verso i poli nell'alto dell'atmosfera, e correnti più basse vicine alla superficie della terra che trasportano aria fredda all'equatore. Questo sistema di correnti atmosferiche dà ragione dei così detti *venti alisei di superficie* e dei *contra-alisei.*

Le doppie invetriate preservano d'inverno le stanze dal raffreddamento, per la poca conduttività dello strato d'aria interposto fra esse; così anche i

panni di lana, le pelliccie tengono caldo per l'aria impegnata fra le fibre e i peli. La segatura di legno, la paglia, il gesso in polvere, ecc., sono altrettanti corpi che conducono male il calore.

189. **Trasformazione reciproca del lavoro e del calore.** — Il lavoro e il calore possono trasformarsi reciprocamente l'uno nell'altro; vale a dire si può ottenere del calore consumando lavoro, e viceversa con la spesa di calore si ottiene del lavoro. È facile difatti convincersi che ogni volta che si consuma del lavoro nel vincere l'attrito, nella percussione, nella compressione, si ottiene una corrispondente quantità di calore. Un esempio ovvio di questa trasformazione del lavoro mediante l'attrito, lo si ha nel forte riscaldamento delle seghe, dei trapani, delle lime usati nei varii lavori; le scintille che si sprigionano dai freni adoperati ad arrestare un convoglio; le ruote dei carri che talvolta si incendiano per l'attrito dei perni, ecc.

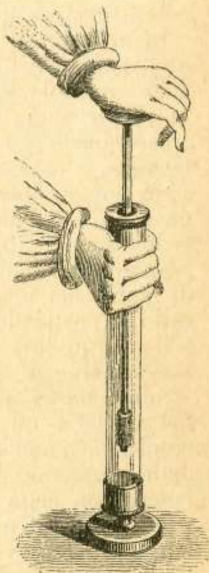


Fig. 206.

Con l'apparecchio della fig. 206, si può mostrare il calore che si genera nel comprimere l'aria: basta attaccare un pezzetto d'esca asciutta alla base dello stantuffo, e dare a questo un colpo secco; ritirando subito lo stantuffo, si constata che l'esca è accesa, onde il nome di *acciarino pneumatico* dato all'apparecchio. Questa esperienza serve a spiegarci l'accensione delle stelle filanti: sono

queste frammenti di materia cosmica che seguono come uno sciame le orbite di vecchie comete; quando la loro trajettoria è poco lontana dalla terra, l'attrazione di questa li fa deviare ed entrare nella nostra atmosfera, dove, movendosi con grande velocità, la loro forza viva si trasforma in calore per la resistenza opposta dall'aria al moto, e per il calore così svolto bruciano con viva luce.

In tutti questi esempi, e se ne potrebbero citare moltissimi altri, nei quali l'energia visibile di un corpo in moto sparisce, non bisogna quindi vedere una distruzione d'energia, ma semplicemente la sua trasformazione in forza viva molecolare, o energia termica, o calore che si voglia dire.

Se con un martello percuotiamo una campana, questa dà un suono, vale a dire le sue particelle si mettono a vibrare. Ora il martello, nell'atto di percuotere la campana, possedeva una certa energia di moto; nell'urto tale energia si è comunicata a tutte le particelle della campana, che così vibrano, e il loro moto passa nell'aria sotto forma di onde sonore, sino a dissiparsi.

Supponiamo ora invece di battere sull'incudine col martello un pezzo di piombo; udremo solo i colpi flosci, non seguiti da vibrazioni simili a quelle della campana. Che succede dunque dell'energia consumata nella percossa? Essa non si trasforma stavolta, come nella campana, in energia sonora, ma si trasforma in energia termica; vale a dire, la forza viva del martello si distribuisce nell'atto della percossa alle molecole del piombo, onde le vibrazioni di queste si fanno più ampie, più rapide, e la massa tutta quanta si scalda.

Riassumendo, diremo che il calore non consiste in una materia peculiare come gli antichi fisici supposero, ma nella somma delle forze vive mole-

colari e atomiche di un corpo, e può ottenersi mediaute la spesa di lavoro meccanico con l'attrito, la compressione, la percussione.

Fin qui abbiamo dato esempi nei quali il lavoro si trasforma in calore, ma la trasformazione reciproca del calore in lavoro non è meno importante: basti citare la macchina a vapore che ha tanta parte nelle industrie e nel progresso umano. In questa macchina che cosa è che compie il lavoro? Non è forse il fuoco che scalda l'acqua della caldaia e la trasforma in vapore? Avviene cioè che una parte del calore ottenuto bruciando il carbone serve ad accrescere la forza viva delle molecole dell'acqua, le quali urtando nel cilindro contro lo stantuffo alternativamente or sull'una or sull'altra delle sue basi, gli comunicano un moto alternativo di va e vieni, e le ruote motrici prendono un rapido movimento intorno all'asse. Tutto il lavoro fatto dalla macchina a vapore è dunque lavoro prodotto dal calore: venne difatti accertato che il vapore uscendo dai cilindri ha in sè meno calore di quello che aveva entrandovi, in ragione del lavoro eseguito. Tali misure vennero eseguite con grande cura da Gustavo Adolfo Hirn, il quale trovò che per ogni caloria scomparsa, il lavoro ottenuto era propriapriamente compreso fra 420 e 432 chilogrammetri.

E la stessa energia muscolare degli animali non ripete la sua origine dal calore? Vedremo (§ 191) le esperienze fatte per dimostrare che noi lavoriamo a spese del nostro calore, dovuto alla combustione con l'ossigeno dell'idrogeno e del carbonio che compongono i nostri tessuti; onde è necessario di risarcire con una sufficiente nutrizione le continue perdite.

190. **Equivalente dinamico della caloria; esperienze di Joule.** — Ciò posto, se è vero che l'energia non può crearsi nè distruggersi, ne con-

segue che per produrre una caloria sarà necessario consumare un lavoro determinato, qualunque sia il modo di trasformazione (attrito, compressione, percussione), e quali che siano i corpi adoperati.

Questa verità fu la prima volta enunciata da Mayer, medico tedesco; ma spetta a Joule, fisico inglese, il merito di avere determinato con l'esperienza la quantità di lavoro equivalente all'unità di calore, ossia l'*equivalente dinamico della caloria.*

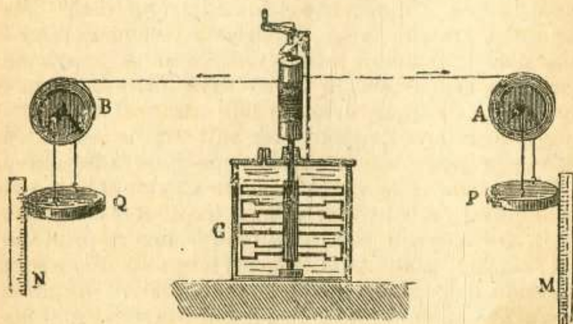


Fig. 207.

A tal uopo Joule eseguì molte esperienze, che sono classiche nella scienza. Noi dovremo contentarci di riferirne una tra le più note. Prese egli un vaso calorimetrico pieno d'acqua, con le pareti speculari per impedire la dispersione del calore per irraggiamento, e sostenuto da una base di legno per impedire la dispersione per conduzione.

Nell'interno del vaso calorimetro (fig. 207) erano fissi alcuni setti muniti di fenditure, attraverso alle quali potevano passare le alette di un mulinello, col pernio o alberetto secondo l'asse del vaso cilindrico. Il calorimetro era posto in alto, e si

faceva rotare il mulinello per mezzo della caduta di due pesi P e Q, essendo il moto trasmesso per mezzo di fili e puleggie: i tramezzi suddetti servivano ad impedire che il liquido prendesse parte alla rotazione. Il rullo di cui era munito l'alberetto e sul quale si avvolgeva il filo, poteva rendersi indipendente dal mulinello, affinchè questo girasse soltanto nella discesa de' pesi, e non quando, per ripetere l'esperienza, essi erano fatti risalire.

Il lavoro consumato per vincere l'attrito nell'interno del calorimetro si poteva facilmente determinare: dal lavoro motore (prodotto della somma dei pesi per l'altezza della loro caduta) si toglieva il lavoro ben piccolo impiegato nel vincere l'attrito dei perni, delle puleggie, e l'altro ben più cospicuo che serviva a comunicare forza viva alle masse di piombo, la quale si spegneva nell'urto contro il suolo. Per calcolare questa parte del lavoro motore, bisognava conoscere la velocità di caduta delle masse P e Q: all'uopo erano disposti lungo l'altezza di caduta de' regoli metrici; la velocità si desumeva dagli spazi percorsi e dai tempi impiegati. Calcolato così il lavoro consumato nel calorimetro a ogni discesa dei pesi, e moltiplicandolo pel numero delle cadute — ne occorrevano una ventina almeno in ogni esperienza per ottenere un sensibile scaldamento — si aveva il lavoro totale L trasformato in calore.

La quantità Q di calore prodotta, tenuto conto delle inevitabili dispersioni, era eguale al calore assorbito dall'acqua e dal vaso nel riscaldarsi; per misurare l'innalzamento di temperatura, sensibili termometri pescavano con i loro bulbi e parte dei cannelli nell'acqua.

Allora, per avere l'equivalente dinamico del calore, non restava che dividere il lavoro consumato L pel calore prodotto Q. Adottando come

unità rispettive il chilogrammetro e la caloria, da molte esperienze, fatte anche con liquidi calorimetrici diversi dall'acqua, risultò come valore medio dell'equivalente meccanico del calore il numero 425; oggi, in seguito a nuove esperienze, si assume come valore più approssimato il numero 427.

Risulta dunque che *il lavoro di 427 chilogrammetri, trasformato completamente in calore, dà luogo alla produzione di una caloria, e viceversa.*

191. **Poteri calorifici.** — Il calore, come ora abbiamo veduto, può avere una origine meccanica; ma la sua produzione più comune è dovuta alla combustione. Ordinariamente si ricorre alla combustione del carbone, cioè alla combinazione chimica del carbonio con l'ossigeno dell'aria: questa combinazione, come ogni altra, si concepisce quale una trasformazione di energia potenziale in energia di moto molecolare. Gli atomi obbedendo alla loro reciproca attrazione si precipitano gli uni sugli altri con grande velocità; nell'urto essi si aggruppano in nuove molecole, alle quali rimane la forza viva acquistata nelle collisioni.

Furono determinate con la massima cura le calorie che si ottengono nella combustione di un peso determinato di molte sostanze; ed è detto *potere calorifico* di un combustibile il numero di calorie che si svolge, quando se ne brucia completamente 1 chilogr. Ecco i poteri calorifici di alcuni combustibili espressi in calorie, ed è indifferente che l'ossigeno sia più o meno diluito con azoto, che la combustione (purchè completa) sia più o meno rapida:

Idrogeno	34600
Protocarburo d'idrogeno . . .	13063
Bicarburo d'idrogeno	11858
Terebenteno	10852

Benzina	10330
Olio di oliva	9862
Acido stearico	9820
Cera	9000
Carbone di legna	8080
Carbone di storta	8047
Grafite	7796
Litantrace	7000
Spirito di vino	7184
Legna perfettamente secca . .	3600
Solfuro di carbonio	3401
Solfo	2221

Il *gas illuminante*, la cui composizione è complessa e varia secondo il combustibile che si distilla per produrlo e secondo la temperatura di distillazione, non ha un potere calorifico determinato, ma alquanto vario. Dalle misure eseguite dall'ing. Wittz con un calorimetro a esplosione, con un calorimetro cioè nel quale il gas mescolato all'aria in una bomba immersa nell'acqua è fatto poi esplodere, si deduce una produzione media di 5200 calorie per ogni metro cubo di gas, misurando il volume a 0° e alla pressione normale dell' atmosfera; e poichè la densità media del gas di illuminazione, relativa all'aria, è eguale a 0,4, se ne deduce che il potere calorifico di 1 chilog. è eguale a 11200 calorie circa.

Nel potere calorifico dell'idrogeno eguale a 34600 è compreso anche il calore che si ottiene per la condensazione del vapore acqueo prodotto nella combustione, nella ragione di 5,4 calorie per grammo di vapore condensato: perciò nelle applicazioni ordinarie dove il vapore viene abbandonato senza condensarlo, sarà da adottare per potere calorifico dell'idrogeno il numero minore 29200 calorie.

Mediante il calore che si sviluppa nelle azioni chimiche, si può approssimativamente trovare il valore dell'energia potenziale atomica (affinità) con calcoli semplici. Per esempio, se un chilogrammo d'idrogeno bruciando sviluppa 34600 calorie, l'energia potenziale sua rispetto all'ossigeno equivale a $34600 \times 427 = 14\,774\,200$ chilogrammetri; e siccome un chilogrammo d'idrogeno bruciando forma 9 chilogrammi di acqua, così possiamo dire che l'urto fra gli atomi di idrogeno e di ossigeno che formano 9 kg. di acqua, equivale a quello di 1 kg. che cadesse nel vuoto dall'altezza di 14 774 200 metri. E questo enorme lavoro è allo stato potenziale, quando l'ossigeno e l'idrogeno trovansi semplicemente mescolati!

192. **Calore animale e lavoro muscolare.** — Vogliamo ora persuaderci che il lavoro muscolare degli animali è eseguito a spese del loro calore. Gli animali hanno una temperatura propria, per lo più superiore a quella dell'ambiente: nei mammiferi anzi essa è indipendente dalla temperatura esterna, e nell'uomo, come si è detto, è di circa 37°. Vediamo ora l'origine di siffatto calore.

Una certa quantità di ossigeno, preso coll'aria inspirata nei polmoni, si discioglie ivi nel sangue, e si combina nell'organismo col carbonio e coll'idrogeno forniti dai vari tessuti, sviluppando calore. Si producono così per tale combustione, insieme col calore, anidride carbonica e vapore acqueo, i quali vengono poi emessi colla espirazione polmonare e colla traspirazione cutanea. Le dette funzioni sono correlative all'ambiente, all'età dell'animale, al suo stato di quiete o di moto. Ma se alla respirazione è dovuta una produzione di calore, la traspirazione è invece accompagnata da una perdita di calore per lo svaporare dei liquidi e l'espan-

sione dei gas; e siffatti guadagni e siffatte perdite sono fra loro commisurati in modo da rendere pressochè costante la temperatura dell'animale. Così appar chiaro che nel nostro corpo avviene di continuo una vera combustione degli elementi che lo compongono, e che a tale combustione è dovuto il nostro calore; e quindi è neccessario di riparare colla nutrizione all'incessante consumo, rifacendo mano a mano i tessuti con nuovi materiali.

Tutto questo avviene sia che riposiamo inerti, sia che lavoriamo: con questa differenza però, che nel secondo caso la respirazione si accelera, e però la combustione dei tessuti si fa più rapida ed aumenta la quantità del calore generato, onde maggiore diventa il bisogno di cibo. Ma questo eccesso di calore come è impiegato? La risposta l'ha data Hirn. Egli costrusse un calorimetro singolare: prese una cameretta ermeticamente chiusa di 4 m^3 di capacità circa, e la circondò di acqua. Una persona vi entrava, e le si somministrava dell'aria pura proveniente da un gazometro, la quale dopo aver servito alla respirazione era raccolta in un secondo gazometro. Così si conosceva la quantità di ossigeno consumato; i termometri poi immersi nell'acqua servivano a valutare il calore prodotto. Si ripetevano le esperienze, o lasciando stare per un certo tempo la persona inerte, o facendole fare un determinato lavoro per un tempo eguale. Confrontando allora nei due casi l'ossigeno consumato e il calore prodotto, Hirn trovò che la stessa persona consumava in un'ora, se in istato di riposo assoluto, gr. 29,65 di ossigeno, producendo 155 calorie; ne consumava invece, nello stesso tempo, compiendo un lavoro di 27428 kgm., gr. 131,74, con la produzione di 251 calorie; mentre secondo il rapporto precedente si sarebbero dovute avere nel ca-

lorimetro 687,7 calorie. Pertanto la differenza fra queste due quantità di calore, cioè 436,7 calorie, rappresenta quella parte di calore che, essendosi pur prodotta, fu impiegata nel lavoro.

La conclusione è che noi (e lo stesso dicasi di tutti gli animali) produciamo lavoro meccanico e consumiamo calore, come succede in una qualsiasi macchina termica; onde per fare un lavoro continuo in un modo qualunque, l'uomo dovrà nutrirsi in modo che il cibo sia capace di fornirgli la quantità di calore necessaria non solo pel lavoro, ma ancora quella che bisogna a mantenere le sue funzioni e il suo calore naturale.

Secondo il fisiologo Moleschott, un uomo che lavora vigorosamente consuma al giorno kg. 0,314 di carbonio, e kg. 0,020 di azoto per le escrezioni, più una certa quantità di idrogeno, di cui aggiungendo l'equivalente in carbonio a 0,314 kg., questo numero diventa 0,370 kg.

Ora secondo Payen:

1 kg. di pane contiene
kg. 0,300 di C e kg. 0,0108 di Az.;
1 kg. di carne contiene
kg. 0,110 di C e kg. 0,0307 di Az.

Da qui si deducono le dosi di pane e di carne che debbono entrare nella razione alimentare di un lavoratore ordinario, senza che vi sia eccesso di pane o di carne, e affinchè vi si trovino quelle quantità di carbonio e di azoto che si sono dette sopra.

Con un calcolo molto semplice si trova che la razione dev'essere composta di:

Pane kg. 1,142
Carne » 0,250

193. **Attinometri. Calore solare.** — La quantità di calore irradiata dal sole si misura con i *piroeliometri,* o con gli *attinometri.* Ve he hanno vari, fondati su principî diversi; noi ci limiteremo a descrivere il piroeliometro di Pouillet.

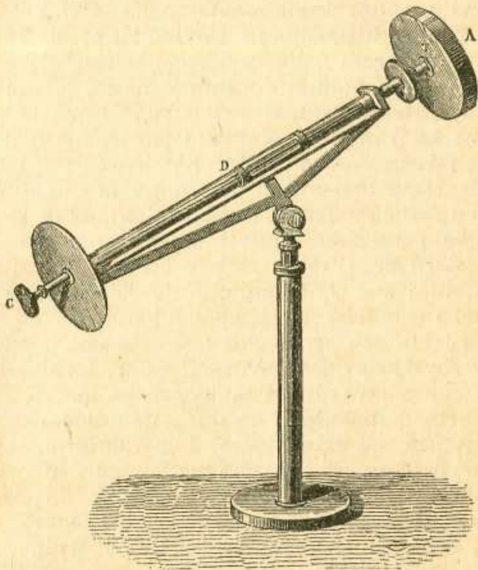


Fig. 208.

Esso consiste in una scatola cilindrica *A* di argento sottilissimo (fig. 208), ricoperta di nero di fumo, la quale contiene una massa conosciuta di acqua (100 gr.), in cui pesca il bulbo d'un termometro. Essa è portata da un tubo vuoto, fesso secondo una generatrice per lasciar vedere il termo-

metro: il tubo poi sostiene alla sua estremità un disco B parallelo ed eguale al fondo della scatola cilindrica. Tutto il sistema è mobile intorno ad un asse, e se si vuole che i raggi del sole cadano perpendicolarmente sulla scatola, bisognerà che l'ombra di questa copra esattamente il disco B. Quando l'istrumento è disposto in tal modo, lo si difende con uno schermo dalla radiazione solare e, mentre è all'ombra, si notano durante 5 minuti le sue variazioni di temperatura: se l'acqua di questo particolare calorimetro è alquanto più fredda dell'ambiente, si riscalda pel calore che riceve; per mezzo di tale riscaldamento si determina la quantità di calore q così guadagnata durante 5 minuti. Si scopre allora l'apparecchio; il riscaldamento continua e per effetto del calore solare e per l'azione del mezzo circostante; sia Q la quantità di calore assorbita durante i 5 minuti d'irraggiamento solare. Se l'influenza del mezzo circostante fosse rimasta la stessa, $Q - q$ sarebbe evidentemente il calore fornito dalla radiazione solare; ma l'influenza del mezzo è variata principalmente a cagione dell'elevazione di temperatura del calorimetro. Per valutarla, si rifà alla fine dell'esperimento una terza misura all'ombra durante altri 5 minuti; se q' è il calore acquistato in quest'ultima esperienza, si potrà ritenere, con buona approssimazione, che durante il tempo dell'esposizione al sole il mezzo circostante abbia fornito al calorimetro la quantità di calore $\frac{q+q'}{2}$; cosicchè quella ricevuta dal sole sarà eguale a:

$$Q - \frac{q+q'}{2}.$$

Conoscendo la superficie della scatola, se ne può dedurre la quantità di calore che arriva nell'unità di tempo sull'unità di area.

Ma il risultato che si ottiene fornisce soltanto la quantità di calore che attraversa l'atmosfera: per determinare quella che perverrebbe alla terra se l'atmosfera non ci fosse, Pouillet studiò l'assorbimento dovuto ai diversi spessori degli strati atmosferici, sperimentando all'uopo in differenti ore del giorno, a mezzodì quando lo strato d'aria attraversato era minore, alla sera quando i raggi debbono fare una via più lunga nell'atmosfera.

Tenuto il debito conto dell'assorbimento atmosferico e della porzione di calore riflesso dal fondo della scatola, sebbene affumicato, Pouillet ha conchiuso che, qualora l'atmosfera non esistesse, la quantità di calore che la superficie di 1^{cm^2} riceverebbe dal sole nella direzione normale in 1 minuto primo, sarebbe 1,76 piccole calorie. La quantità di calore ora definita è detta *costante solare*.

Con questo dato si può facilmente calcolare la quantità di calore che, in 1 minuto primo, riceve dal sole l'emisfero illuminato della superficie terrestre: essa è eguale a quella che riceverebbe la sua proiezione, ossia il circolo massimo perpendicolare ai raggi solari; chiamando dunque R il raggio della terra espresso in centimetri, il detto calore sarà $1,76\ \pi\ R^2$ piccole calorie. Supponendo poi la distribuzione uniforme, e tenuto conto che ogni punto della terra riceve calore dal sole soltanto la metà del tempo, si può calcolare il calore che ogni unità di area riceve in un anno dal sole. Il risultato è questo: se il calore fosse uniformemente ripartito su tutti i punti del globo, e fosse impiegato, senza perdita alcuna, a fondere del ghiaccio, sarebbe capace di liquefarne uno strato che inviluppasse la terra collo spessore di circa 31 metri. Questa è la più semplice espressione della immensa quantità di calore che la terra riceve in un anno dal sole.

Se ora si traccia intorno al sole una sfera di raggio pari alla distanza media del sole dalla terra, eguale a 148450000 km. circa, sarà facile calcolarne la superficie; e riflettendo che ogni cm^2 riceve in un minuto primo 1,76 piccole calorie, si deduce che il sole irradia in questo tempo 48×10^{26} grandi calorie, ossia più di quelle che si otterrebbero bruciando 600 trilioni (600×10^{18}) di chilogrammi di carbone: è chiaro che tutti questi numeri non servono che a dare un'idea approssimativa dell'enorme quantità di calore emessa dal sole.

Moltiplicando poi il numero delle calorie dette qui sopra per 427, si ha in kgm. l'energia corrispondente a tanta emissione di calore. Il calore irraggiato soltanto sul nostro pianeta in un anno equivale ad un lavoro veramente meraviglioso, per fare il quale occorrerebbero non meno di 550 miliardi di macchine a vapore da 400 cavalli ciascuna, che lavorassero senza tregua dì e notte!

La mente nostra si fa appena un'idea di questi numeri e di questi risultati che riempiono l'anima della più grande ammirazione. E se per la costante solare, invece del valore assegnatole dal Pouillet, se ne assume uno maggiore, secondo il risultato di più recenti ricerche, i detti numeri crescono ancora.

194. **Dilatazione termica dei solidi; dilatazione lineare.** — Fornendo calore ad un corpo, aumenta la somma delle forze vive molecolari, vale a dire si accrescono la rapidità e l'ampiezza delle oscillazioni delle sue molecole, onde nasce un aumento della sua temperatura e del suo volume. Talvolta, anzichè l'accrescimento del volume di un corpo, importa conoscere quello della sola lunghezza, come nel caso delle travature metalliche, delle guide delle ferrovie, ecc.: in questi casi fa d'uopo studiare la *dilatazione lineare*.

Per dimostrare in lezione la dilatazione lineare si può far uso dell'apparecchio della fig. 209: un'asta metallica di conveniente lunghezza è fissata pel suo capo *A* col mezzo di una vite; l'altro capo *B* è libero di estendersi, ma nel far ciò preme contro il braccio corto di una lunga e sottile leva che serve da indice, e la fa innalzare. Pertanto, se l'asta si dilata anche di poco, la variazione nella sua lun-

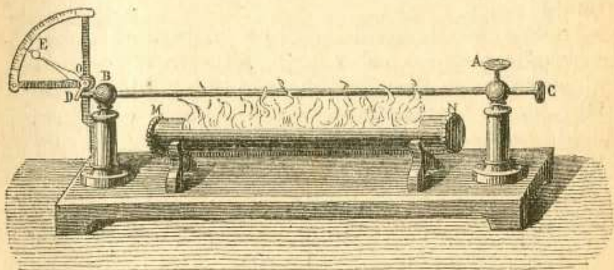


Fig. 209.

ghezza si renderà facilmente visibile cogli spostamenti dell'indice. Ponendo ora delle lampade a gas o ad alcool al disotto dell'asta, così da scaldarla in tutta la sua lunghezza, constateremo che essa difatti si allunga e fa alzare l'indice; indi spegnendo le fiamme, l'asta si raffredda, si raccorcia, e in breve tempo l'indice retrocede alla sua prima posizione.

Supponiamo di avere misurato con qualche mezzo acconcio la dilatazione Λ che *l'unità di lunghezza* di una spranga subisce, quando la si riscalda da una temperatura t ad un'altra s: diremo *coefficiente di dilatazione lineare medio* fra le dette due temperature, il quoziente che si ottiene dividendo la di-

latazione pel corrispondente intervallo di temperatura; indicandolo con λ_m, si ha:

$$\lambda_m = \frac{\Lambda}{s - t}.$$

Il detto coefficiente esprime pertanto l'aumento medio che subisce l'unità di lunghezza, quando si scalda la sbarra di 1 grado fra i detti limiti di temperatura.

E volendo il coefficiente di dilatazione lineare vero alla temperatura t, bisognerà trovare il limite al quale tende l'espressione suddetta quando l'intervallo di temperatura diventa infinitamente piccolo: indicando cioè con λ_t il coefficiente di dilatazione alla temperatura t, si ha:

$$\lambda_t = \lim_{s=t} \frac{\Delta}{s - t}.$$

Ciò vuol dire che il coefficiente di dilatazione è una funzione della temperatura; e difatti le più accurate esperienze provano che esso, a tutto rigore, non è costante, ma aumenta un poco con la temperatura. Tali variazioni però sono piccole, cosicchè nei problemi si assume il coefficiente medio di dilatazione lineare fra due temperature limiti, e lo si ritiene costante.

Nella seguente tavola sono indicati i coefficienti medi di dilatazione lineare fra 0° e 100° per alcuni corpi:

Vetro bianco	da	0.000 007	a	0.000 009
Flint glas	»	0.000 008	»	0.000 009
Granito	»	0.000 008	»	0.000 009
Platino	»	0.000 008	»	0.000 010
Palladio	»	0.000 010		
Antimonio	»	0.000 011		

Ferro fuso	da	0.000 010 a 0.000 011
Ferro	»	0.000 011 » 0.000 015
Acciaio non temperato . . .	»	0.000 011 » 0.000 012
Acciaio temperato	»	0.000 012 » 0.000 014
Bismuto	»	0.000 014
Oro	»	0.000 014 » 0.000 015
Rame	»	0.000 017 » 0.000 019
Ottone	»	0.000 018 » 0.000 021
Argento	»	0.000 019 » 0.000 021
Saldatura (2 rame, 1 zinco) .	»	0.000 020
Stagno	»	0.000 019 » 0.000 025
Alluminio	»	0.000 022
Piombo	»	0.000 028 » 0.000 029
Zinco	»	0.000 029 » 0.000 034

Quanto al legno, esso ha un diverso coefficiente di dilatazione non solo secondo la qualità, ma anche, per la stessa specie di legno, secondo che la dilatazione si consideri nel senso della fibra o trasversalmente. Ecco, secondo Villari, alcuni di tali coefficienti:

	Perpendicolari	Paralleli
Bosso . . .	0,0000614	0,00000257
Abete . . .	584	371
Quercia . .	544	492
Mogano . .	404	361
Pioppo . . .	365	385
Pino. . . .	341	541
Castagno . .	325	649

195. **Problemi relativi alla dilatazione lineare dei solidi.** — Supponendo il coefficiente di dilatazione indipendente dalla temperatura, risolviamo i seguenti problemi:

1.° Data la lunghezza l_0 di una spranga a 0°, quale sarà la sua lunghezza l_t a t^0?

Dicendo λ il coefficiente di dilatazione lineare, l'allungamento corrispondente a t^0 e ad una

lunghezza l_0 sarà $\lambda\, t\, l_0$; cosicchè la lunghezza l_t sarà:

$$l_t = l_0 + \lambda\, t\, l_0;$$

e ponendo l_0 a fattore comune si ha:

$$l_t = l_0 (1 + \lambda\, t).$$

Il binomio fra parentesi è detto *binomio di dilatazione lineare.*

2.° Reciprocamente, data la lunghezza l_t a t^0, quella a 0^0 è data dalla relazione:

$$l_0 = \frac{l_t}{1 + \lambda\, t}.$$

3.° Data la lunghezza l_t di un'asta metallica a t^0, quale sarà la sua lunghezza l_s a s^0?

Si trova prima la lunghezza l_0 a 0^0 dividendo l_t pel binomio di dilatazione corrispondente, ossia:

$$l_0 = \frac{l_t}{1 + \lambda\, t}$$

ora conosciuta la lunghezza a 0^0, per avere quella a s^0 basta moltiplicare pel binomio di dilatazione corrispondente; ossia:

$$l_s = \frac{l_t}{1 + \lambda\, t}(1 + \lambda\, s).$$

196. **Dilatazione cubica.** — La dilatazione cubica è l'aumento di volume che subisce un corpo quando viene riscaldato. Se il corpo è isotropo, vale a dire ha uniforme struttura in ogni direzione, conserverà dopo il riscaldamento una figura simile, poichè la dilatazione accade egualmente in tutte le direzioni: si può vedere che in tal caso il *coefficiente di dilatazione cubica* ossia, l'aumento che subisce l'unità di volume quando si scalda di 1^0,

è triplo del coefficiente di dilatazione lineare. Difatti, indicando con V_0 il volume a 0° e con V_t quello a t^0 sarà:

$$\frac{V_t}{V_0} = \frac{l^3_t}{l_0^3} = (1 + \lambda\, t)^3 = 1 + 3\,\lambda\, t + 3\,\lambda^2\, t^2 + \lambda^3\, t^3 ;$$

e poichè λ è un numero piccolissimo, non si commette errore apprezzabile trascurandone la seconda e la terza potenza; cosicchè potremo scrivere:

$$V_t = V_0 (1 + 3\,\lambda)\, t ,$$

vale a dire il coefficiente di dilatazione cubica è triplo del cofficiente di dilatazione lineare, come si è detto. E ponendo per brevità $\alpha = 3\,\lambda$, scriveremo:

$$V_t = V_0 (1 + \alpha\, t) ,$$

formula del tutto simile a quella della dilatazione lineare, nella quale alle lunghezze sono sostituiti i volumi, e in luogo del coefficiente di dilatazione lineare, compare il coefficiente di dilatazione cubica. Ne viene che si può, quanto alle dilatazioni cubiche, risolvere una serie di quistioni analoghe a quelle che abbiam detto per le dilatazioni lineari, tenendo lo stesso procedimento.

Ma sarà bene, prima d'andare innanzi, di convincerci con esempi che in realtà si commette un errore trascurabile, col non tener conto delle potenze di λ superiori alla prima.

Prendiamo, come esempio, il coefficiente di dilatazione λ dello zinco che è il maggiore pei metalli ed eguale a 0,000 03:

$$\begin{aligned} 3\,\lambda &= 0{,}000\,09 \\ 3\,\lambda^2 &= 0{,}000\,000\,002\,7 \\ \lambda^3 &= 0{,}000\,000\,000\,000\,027 \\ \hline (1 + \lambda)^3 &= 1{,}000\,090\,002\,700\,027 \end{aligned}$$

Ora, a cagione degli errori inevitabili delle esperienze, non si può contare sull'esattezza dell'ultima cifra del prodoto 3λ; sarebbe pertanto illusorio di aggiungere i decimali che provengono dai valori di $3\lambda^2$ e di λ^3.

197. **Variazione del peso specifico colla temperatura.** — Poichè il volume di un corpo dipende dalla sua temperatura, è chiaro che il peso specifico deve variare con essa, e propriamente esso diminuisce quando la temperatura aumenta.

Difatti, sia P il peso di un corpo: indicandone con V_0 e p_0 il volume e il peso specifico a 0°, con V_t e p_t il volume e il peso specifico a $t°$, si ha:

$$P = p_0\ V_0 = p_t\ V_t = p_t\ V_0 (1 + \alpha\ t);$$

da cui si deduce subito che:

$$p_t = \frac{p_0}{1 + \alpha\ t}.$$

Se è dato il peso specifico p_t di un corpo a t_0 e si cerca quello a s_0, ragionando nello stesso modo sarà:

$$P = p_t\ V_0 (1 + \alpha\ t) = p_s\ V_0 (1 + \alpha\ s);$$

da cui si deduce subito che:

$$p_s = p_t \frac{1 + \alpha\ t}{1 + \alpha\ s}.$$

Questa relazione serve spesso a determinare il coefficiente di dilatazione cubica di quelle sostanze, delle quali non è noto il coefficiente di dilatazione lineare. E invero si deduce da essa che:

$$\alpha = \frac{p_t - p_s}{s p_s - t p_t}.$$

198. **Leggi della dilatazione dei solidi e loro applicazioni.** — Le esperienze di Lavoisier e Laplace hanno provato che tra 0° e 100° il coefficiente di dilatazione si può ritenere costante, di guisa che l'allungamento delle sbarre tra questi limiti è proporzionale all'accrescimento della loro temperatura. Inoltre fra i detti limiti, i differenti corpi solidi riprendono sensibilmente la loro lunghezza iniziale, se dopo averli scaldati, li si lascia tornare lentamente alla loro temperatura primitiva.

Ma oltre il limite di 100° il coefficiente di dilatazione cresce, non però proporzionatamente alla temperatura, e neanche nel medesimo rapporto in tutti i corpi. Inoltre la dilatazione di una stessa sostanza varia secondo lo stato di aggregazione delle sue molecole: così un metallo ha differente coefficiente secondo che sia stato o no battuto, compresso, temprato. ecc.

L'ebanite, ossia la gomma vulcanizzata e indurita, ha un coefficiente di dilatazione così grande, che se un termometro avesse il bulbo della detta sostanza, il mercurio che si dilata meno vi scenderebbe con il riscaldamento.

Tutto questo vale per i corpi isotropi, costituiti cioè egualmente in tutte le direzioni; ma nei cristalli, fatta eccezione per quelli del sistema monometrico, la dilatazione varia secondo gli assi di cristallizzazione.

I vari legni poi hanno anch'essi coefficienti di dilatazione diversi, parallelamente o perpendicolarmente alle fibre.

Le argille, invece di dilatarsi, presentano la particolarità di restringersi quando sono scaldate, forse a causa di un più intimo aggruppamento dei loro componenti. Su questa proprietà che hanno le argille di contrarsi col calore, è fondato il *pirometro*

ideato da *Wedgewood* (fig. 210), per apprezzare la temperatura dei forni. Consiste in un cilindretto di argilla, che può scorrere fra due guide lievemente inclinate fra loro; a seconda che l'argilla si avanza più o meno tra le guide per la maggiore o minore contrazione subita, si argomenta la maggiore o minore temperatura della fornace nella quale venne immersa. Questo pirometro dà solo un'idea approssimativa della temperatura, e non può servire come strumento di misura. La misura delle alte temperature è difficile a farsi con esattezza, e lo strumento più esatto è il termometro ad aria, del quale

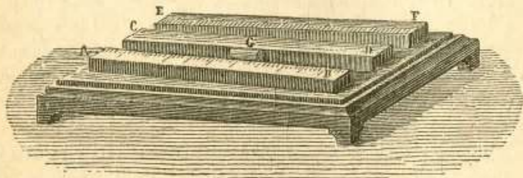


Fig. 210.

discorreremo in seguito. All'uopo vennero ideati anche pirometri elettrici, come quello Le-Chatelier, e pirometri ottici, come quello Wanner.

Sulla diversa dilatabilità dei metalli è fondato il *termometro di Breguet*. Tre lamine di platino, d'oro e d'argento, sovrapposte nell'ordine detto e passate al laminatoio, si saldano insieme: si taglia poi una strisciolina del foglio così ottenuto e la si piega ad elica col platino di fuori. La spirale fissata superiormente ad una colonnetta di sospensione (fig. 211), porta nella estremità inferiore un indice leggero: col riscaldamento essa si svolge perchè l'argento si dilata più dell'oro e il platino meno, e fa spostare l'ago dinanzi a un cerchio sul quale sono segnati i

gradi di temperatura. L'elica, al contrario, si avvolgerebbe stringendo le spire, se l'argento fosse all'esterno dal lato convesso e il platino all'interno dal lato concavo. La graduazione dell'istrumento si fa col confronto: ciò che rende pregevole questo termometro è la prontezza delle sue indicazioni, la qual cosa va dovuta alla piccola massa dell'elica e alla estesa sua superficie.

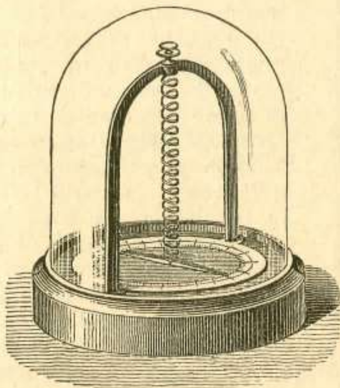


Fig. 211.

Un'altra applicazione della dilatazione dei solidi è il *pendolo a compensazione.* Il pendolo applicato agli orologi va soggetto, col mutare della temperatura dell'ambiente in cui è posto, a continue variazioni nella sua lunghezza; e però variando la distanza tra il punto di sospensione e il centro di oscillazione, il periodo non può mantenersi costante. E propriamente accade che, d'estate, la lunghezza diventando maggiore, la durata di oscillazione au-

menta e l'orologio è in ritardo; il contrario succede d'inverno. Per ovviare a tale inconveniente Harrisson suggerì per il primo di fare l'asta del pendolo di due metalli dlfferenti, uniti in modo che la dilatazione dell'uno sia compensata dalla dilatazione in senso inverso dell'altro, così da rimanere immutata la distanza tra il centro di sospensione e il centro di oscillazione. La fig. 212 ne rappresenta uno formato da una molla che porta un telaio con asticciuole di ferro e di zinco, congiunte in modo che mentre le prime sono libere di allungarsi in un senso, le seconde non possono allungarsi che nel senso contrario. Ora, affinchè la lunghezza del pendolo resti costante, è necessario che l'allungamento delle asticciuole di ferro eguagli quello delle asticciuole di zinco: ne nasce che le lunghezze utili per la dilatazione debbono essere in ragione inversa dei coefficienti dei due metalli; e poichè i coefficienti del ferro e dello zinco sono presso a poco nel rapporto di 11 a 29, le loro lunghezze devono evidentemente essere nel rapporto inverso di questi numeri.

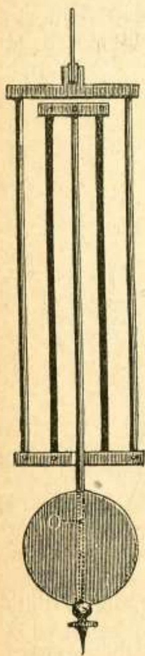
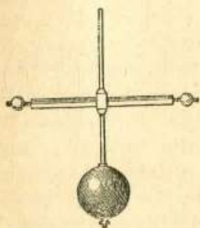


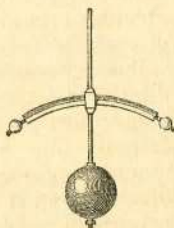
Fig. 212.

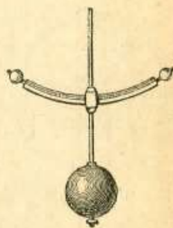
Un altro modo più esatto di compensare il pendolo è quello suggerito dal Graham. Codesto pendolo si compone di un'asta di ferro, che in basso si allarga a mo' di staffa e sostiene un vaso cilindrico di vetro pieno di mercurio; l'altezza del liquido è calcolata in modo, che

la sua dilatazione sollevi di tanto il centro di oscillazione, di quanto questo si abbassa per la dilatazione del ferro. La compensazione a questo modo può farsi in modo perfetto.

Si perviene anche a compensare il pendolo unendo alla sua asta (fig. 213) un regolo formato con una striscia di rame e una di ferro saldate insieme, munite di due sferette all'estremità; la striscia di rame più dilatabile è sotto a quella di ferro. Quando la temperatura si abbassa, l'asta del pen-


Fig. 213.


Fig. 214.


Fig. 215.

dolo si accorcia e la lente si rialza, ma allora la riga formata dalla doppia lamina metallica si curva come indica la fig. 214, perchè il rame si contrae più del ferro. Così avviene che le due sferette fisse alle estremità si abbassano, e se le loro masse sono scelte convenientemente, si verifica la voluta compensazione. Quando, al contrario, la temperatura si innalza, la lente discende, ma le due sferette risalgono e havvi ancora compensazione (fig. 215). Insomma, quel regolo non istarà in piano che ad una sola temperatura, e si incurverà a tutte le altre.

In moltissimi altri casi bisogna tener conto della dilatazione termica dei solidi. Per esempio, negli

orologi da tasca il bilanciere che regola il periodo delle oscillazioni, si compensa formandolo di tre archi (fig. 216), ciascuno fatto di due metalli, dei quali quello che si dilata di più è dal lato convesso. — Nel costrurre un ponte di ferro, bisogna fare in modo che il ferro stesso abbia agio di dilatarsi, poichè nell'estate il ponte sarà un po' più lungo che nel verno, e se esso non avesse spazio per allungarsi, colla sua forza di espansione metterebbe in pericolo la propria stabilità. Tale precauzione è difatti usata nel costruire i lunghi ponti, che servono al transito dei treni ferroviari.

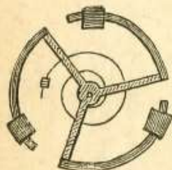


Fig. 216.

Così pure, essendo i metalli più dilatabili dei materiali da costruzione, bisogna che le grate dei fornelli non siano murate, ma abbiano agio di dilatarsi; senza di che premendo esse sulla muratura, la sfascerebbero. Ed anche, volendo costrurre tettoie metalliche, non bisogna inchiodare le lastre, ma incanalarle in apposite guide; tra le rotaie delle ferrovie bisogna lasciare un certo spazio, ecc.

In parecchi casi noi utilizziamo questa forza di espansione e di contrazione dei corpi. Per esempio, nel fabbricare le ruote dei carri, il cerchio di ferro col quale le si vuol serrare, vien prima fatto arroventare, ed in tale stato è applicato a forza sul contorno della ruota; indi il cerchio stesso, raffreddato rapidamente, si contrae e stringe molto forte tra di loro le varie parti.

Si profitta anche della dilatazione dei solidi per rimettere in equilibrio le pareti degli edifizi, che uscendo dalla verticale minacciano talvolta di crollare. A tal fine si pongono attraverso due muri

opposti delle verghe di ferro che hanno conveniente lunghezza, e un foro a ciascuna estremità: facendole poi dilatare col riscaldamento, si introducono nei detti fori spranghe robuste di ferro (chiavarde), le quali, allorquando le verghe si contraggono col raffreddamento, riconducono le pareti alla loro posizione di equilibrio.

Un corpo esercita una pressione grandissima contro gli ostacoli che si oppongono alle sue va-

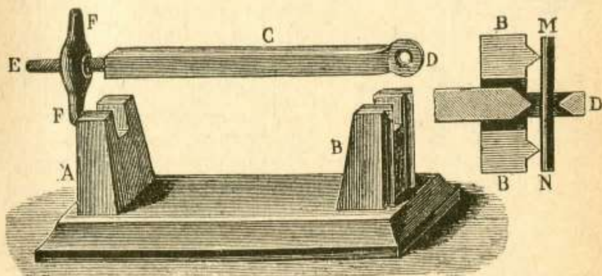


Fig. 217.

riazioni di volume. Si può mettere in evidenza questa pressione con una facile esperienza: all'uopo si prende una sbarra parallelepipeda di ferro battuto lunga un 25^{cm} con il lato di 15^{mm}, avente un foro circolare col bordo tagliente ad un'estremità, e un passo di vite *E* all'altro (fig. 217). La si arroventa, e dopo averla messa nel robusto sostegno di ferro *A B*, s'introduce un bastoncino di ghisa *M N* nel foro *D* come indica la figura, e la si stringe per bene contro i due spigoli di *B* serrando la madrevite *F*: se si raffredda la verga versandovi sopra dell'acqua, essa nella sua contrazione esercita tale

sforzo da rompere nel mezzo bruscamente il bastoncino *MN*.

199. **Dilatazione termica de' liquidi: dilatazione assoluta e dilatazione apparente.** — Dovendo un liquido essere contenuto in un vaso, non si può elevarne la temperatura senza che il vaso stesso si dilati e dissimuli, almeno in parte, l'accrescimento di volume. Di qui la necessità di studiare separatamente: 1° la *dilatazione apparente* del liquido nel vaso che lo contiene; 2° la sua *dilatazione vera* o *assoluta*, considerata indipendentemente da quella del vaso. Si definisce, come pei solidi, *coefficiente di dilatazione assoluta di un liquido* l'aumento reale che avviene nell'unità di volume, quando la temperatura si eleva di 1 grado.

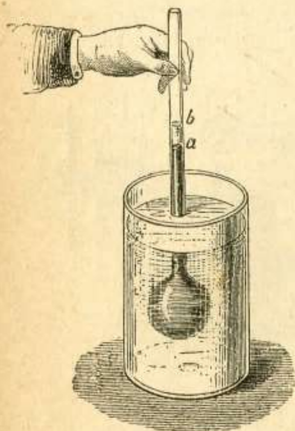


Fig. 218.

Si rende sensibile l'influenza della dilatazione del vaso, immergendo rapidamente nell'acqua calda un termometro avente una grande ampolla, e riempito sino a un certo punto del tubetto capillare con alcool colorato (fig. 218). Nel momento dell'immersione del termometro, l'alcool si abbassa nel tubo da *b* in *a*, ciò che evidentemente è dovuto al fatto che il vaso si dilata per il primo; bentosto però il calore passa al liquido attraverso alla parete, e siccome il liquido ha una dilatazione maggiore di quella del

vetro, il livello risale presto nel tubo e oltrepassa il punto *b*.

È importante di notare che, quando si scalda un vaso, l'accrescimento del suo volume interno è uguale a quello di un nucleo solido della medesima sostanza, il quale riempisse esattamente la capacità del vaso.

È evidente poi che *la dilatazione assoluta è eguale alla dilatazione apparente, più la dilatazione del recipiente.*

200. **Coefficiente di dilatazione assoluta del mercurio.** — Ne segue che per determinare la dilatazione assoluta di un liquido, occorre conoscerne la dilatazione apparente in un vaso di cui sia nota la dilatazione cubica; ora i recipienti sono per lo più di vetro, e le varie specie di vetro si dilatano in modo diverso non solo, ma lo stesso vetro ha una diversa dilatazione a seconda dei riscaldamenti subìti e della rapidità con cui si è poi raffreddato. Si vede da qui quanto era importante di poter determinare la dilatazione assoluta di un liquido, evitando l'influenza della dilatazione del vaso. Questo problema fu risoluto da Dulong e Petit, i quali misurarono la *dilatazione assoluta* del *mercurio,* basandosi sul seguente principio: due vasi di vetro comunicanti fra loro contengono del mercurio; quando uno è mantenuto invariabilmente a 0° e l'altro è portato ad una temperatura t, se le due colonne liquide non possono mescolarsi, è chiaro che le loro altezze al di sopra della comune superficie di separazione saranno in ragione inversa dei pesi specifici. E poichè il rapporto dei pesi specifici può esprimersi in funzione del coefficiente di dilatazione, si vede che dalla misura delle altezze delle due colonne si può dedurre la dilatazione assoluta del liquido. La variazione del vo-

lume dei vasi non altera punto il *rapporto* di tali altezze.

L'apparecchio usato dai detti fisici consiste in due tubi di vetro *A* e *C* pieni di mercurio e comuni-

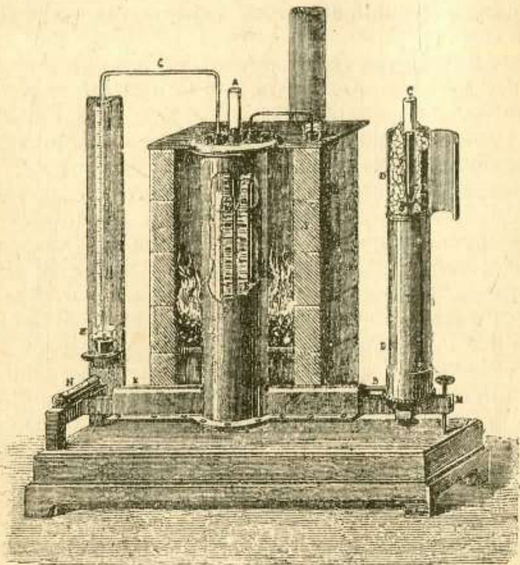


Fig. 219.

canti fra di loro nel fondo per mezzo di un tubo capillare: essi sono mantenuti verticalmente sopra una base di ferro *KM* (fig. 219), resa orizzontale col mezzo di viti calanti. I due tubi sono circondati ciascuno da un manicotto metallico: il più piccolo *DD* è riempiuto di ghiaccio frantumato, co-

sicchè il mercurio del tubo C è a 0°; l'altro manicotto contiene dell'olio riscaldato per mezzo di un fornello che, per maggiore chiarezza, nella figura si vede aperto: la temperatura dell'olio, e quindi quella del mercurio contenuto nel tubo A, era data da buoni termometri. Le altezze h_0 e h_t del mercurio nei due rami sopra l'asse orizzontale del tubo capillare B erano misurate con grande esattezza per mezzo del catetometro, inventato precisamente nell'occasione di questa esperienza. Dicendo p_0 e p_t il peso specifico del mercurio a 0° e a t°, si ha per il principio d'idrostatica qui sopra ricordato che:

$$h_0 \, p_0 = h_t \, p_t \, ;$$

e poichè $p_t = \frac{p_0}{1 + \alpha \, t}$, sostituendo e riducendo si ha:

$$h_0 (1 + \alpha \, t) = h_t \, ,$$

da cui:

$$\alpha = \frac{h_t - h_0}{h_0 \, t} \, ,$$

la quale dà il coefficiente α di dilatazione assoluta del mercurio.

Queste esperienze, sebbene condotte con grandissima cura, erano soggette a qualche causa d'errore che è bene notare: innanzi tutto è difficile potere ammettere che la temperatura della colonna d'olio, la quale non si poteva agitare, fosse la stessa in tutte le sue parti, e quindi era un po' incerta la temperatura del mercurio nel ramo riscaldato. Di poi la differenza di altezza ne' due rami, essendo questi lunghi un 55^{cm} soltanto, riusciva molto piccola, e un errore commesso in tale misura diventava notevole per rispetto alla grandezza da misurare. Tuttavia i numeri trovati da Dulong e Petit si

avvicinano grandemente a quelli ottenuti più tardi da Regnault, che riprese questi esperimenti e queste misure col massimo rigore. Risulta dalle sue esperienze che fra 0° e 100° il coefficiente medio di dilatazione assoluta del mercurio è:



Fig. 220.

$$\alpha = 0{,}000181.$$

Vediamo ora come si possa trar profitto di questo dato per lo studio della dilatazione degli altri liquidi. I metodi ordinariamente adoperati sono due: quello del *dilatometro* e del *termometro a peso;* noi ci occuperemo solo del primo, che è il più usato.

201. **Dilatometro.** — Il dilatometro consiste in un cannello diviso in parti di eguale capacità; termina in alto con un imbuto fornito di tappo smerigliato, e in basso con un grosso bulbo a modo d'un termometro (fig. 220). Per determinare con questo strumento la dilatazione assoluta dei liquidi, bisogna prima misurare, a una temperatura data, la capacità del bulbo fino al principio delle divisioni, e quella di ciascuna divisione del cannello. Questa è una operazione frequentemente richiesta in fisica, e converrà descriverla con qualche particolare pratico. Si comincia a riempire l'apparecchio con mercurio fino a un certo punto del cannello, adoperando le stesse precauzioni indicate per la costruzione di un termometro; sia P il peso del mercurio introdotto. Si circonda l'istrumento con ghiaccio fondente, e si nota che il mercurio occupa tutta la capacità V_0 del bulbo e di più n di visioni del cannello. Il volume del mercurio a 0° è $\frac{P}{p_0}$, indicando con p_0

il suo peso specifico a 0°; e se si chiama v il volume ancora sconosciuto di ciascuna divisione a 0°, si ha:

$$(1) \qquad \frac{P}{p_0} = V_0 + n\,v.$$

Poi, scaldando il dilatometro, si fa uscire un po' di liquido il cui peso indichiamo con P'. Riportando l'istrumento nel ghiaccio, si trova che il liquido rimasto arriva alla divisione n': ossia il liquido uscito occupava a 0° il numero di divisioni $n - n'$, e si ha per conseguenza che $\frac{P'}{p_0} = (n - n')\,v$; da questa si ottiene il volume di una divisione a 0°:

$$(2) \qquad v = \frac{P'}{p_0\,(n - n')}.$$

Sostituendo in luogo di v nella (1) il valore così determinato, si ha:

$$(3) \qquad V_0 = \frac{P}{p_0} - \frac{n}{n - n'} \cdot \frac{P'}{p_0}.$$

Determinate così la capacità del bulbo sino alla origine delle divisioni e quella di ciascuna divisione a 0°, resta a trovare, per la taratura dell'istrumento, la dilatazione cubica del vetro. A tale uopo si scalda il dilatometro a una temperatura t^0; allora il volume del mercurio che v'è rimasto sarà:

$$(V_0 + n'\,v)\,(1 + \Delta)$$

se Δ indica la dilatazione dell'unità di volume per il riscaldamento di t^0; ma se allora il liquido arriva al segno n'', la capacità del dilatometro fino a tale divisione sarà anche $V_0 + n''\,v\;(1 + K)$, se con K s'indica la dilatazione dell'unità di volume del vetro per lo scaldamento di t^0. Eguagliando

queste due espressioni, si può calcolare la dilatazione cubica del recipiente fra 0° e t^0.

Determinati così V_0, v, K, l'istrumento può servire allo studio della dilatazione assoluta di un liquido qualunque. Basterà riempirlo del detto liquido e determinarne il volume a 0°; di poi, scaldandolo sino a t^0, si misura la sua dilatazione apparente; aggiungendo a questa la dilatazione del recipiente, si ha la dilatazione assoluta nell'intervallo di temperatura suddetto.

202. **Risultati più importanti.** — Ecco i risultati più interessanti degli studi sperimentali sulla dilatazione assoluta dei liquidi:

1.° Per uno stesso liquido la dilatazione non è esattamente proporzionale alla temperatura, ma cresce più rapidamente; vale a dire il coefficiente di dilatazione dipende dalla temperatura e aumenta con questa. Tuttavia, per ciò che concerne specialmente il mercurio, le variazioni sono assai piccole: Regnault ha difatti trovato che da 0° a 100° le indicazioni di un termometro a mercurio differiscono poco da quelle di un termometro ad aria posto nelle medesime condizioni; ma alle temperature superiori l'indicazione del termometro a mercurio supera di alcuni gradi quella del termometro ad aria, come lo mostra il seguente quadro:

Termometro ad aria	Termometro a mercurio
200°	202°,78
250°	253°,22
300°	308°,21
350°	362°,16

2.° Per gli altri liquidi la legge della dilatazione si allontana ancora di più dalla semplice proporzionalità.

Pierre ha studiato con molta cura la dilatazione assoluta di vari liquidi; ecco alcuni risultati:

	Coefficiente medio alla temperatura di ebollizione	Temperatura di ebollizione
Alcool ordinario . . .	0,001195	78°
Etere ordinario	0,001647	36°
Cloroformio	0,001320	63°
Aldeide	0,001827	22°

3.° Un liquido quando venga scaldato sufficientemente, finisce col decomporsi o col bollire assumendo lo stato aeriforme; si può però impedire l'ebollizione sottoponendolo ad una forte pressione. Mantenendo con tale espediente certi liquidi nel loro stato, se ne è potuta studiare la legge di dilatazione, e si è trovato che il coefficiente di dilatazione aumenta di molto colla temperatura; alcuni liquidi volatili arrivano a dilatarsi tre o quattro volte più dell'aria. Questo fatto avvertito prima dal Thilorier, venne di poi confermato dalle esperienze del Drion, le quali riguardano tre liquidi assai volatili, ossia l'etere cloridrico, l'acido ipoazotico e l'anidride solforosa. Per l'etere cloridrico, per esempio, è a 110° che il coefficiente di dilatazione raggiunge il valore di quello dell'aria; a 130° esso è già tre volte maggiore.

Il coefficiente di dilatazione dell'aria è 0,00367, come vedremo.

203. **Massimo di densità dell'acqua.** — Fra tutti i liquidi l'acqua, come è chiaro, presenta il maggiore interesse. Ora la legge della dilatazione sua non rassomiglia a quella degli altri liquidi: l'acqua offre questa particolare proprietà che, abbassandosi la sua temperatura, essa si contrae sino a 4°; ma al disotto di questa temperatura, sebbene il raffreddamento continui, il liquido, in-

vece di contrarsi, si dilata sino al punto di congelazione che avviene a 0°; cosicchè una massa di acqua a 4° occupa il minimo volume, ossia ha un massimo di densità.

L'esistenza di questo massimo si può dimostrare colla esperienza seguente dovuta a Hope. Una pro-

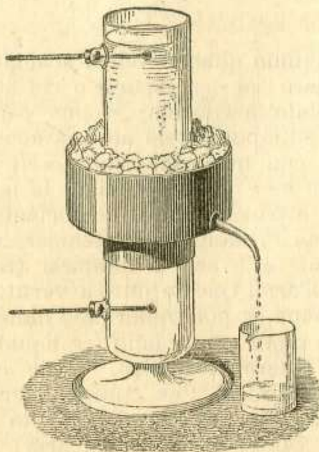


Fig. 221.

vetta di vetro munita di piede, ha lateralmente due fori, l'uno alla parte superiore, l'altro alla inferiore, nei quali col mezzo di tappi sono fissati due termometri aventi i bulbi sull'asse del cilindro (fig. 221); un manicotto riempiuto di ghiaccio circonda la parte media della provetta. Versando in questa acqua a 10° o 12°, si osserva che il termometro inferiore si abbassa con una certa rapidità fino a 4°; poi esso diviene stazionario, mentre il

termometro superiore discende non solo a 4°, ma anche fino a 0°. È facile spiegare questo risultato: l'acqua della provetta raffreddandosi gradatamente fino a 4°, si fa sempre più densa e scende nel fondo, dove rimane. Se il raffreddamento continua, l'acqua diventa specificamente più leggiera, galleggia su quella del fondo, e allora il termometro superiore discende fino a 0°. Insomma l'acqua a 4° che occupa costantemente il fondo del vaso, ha una densità maggiore di quella che compete ad ogni altra temperatura.

Questa esperienza serve bene a provare che l'acqua ha un massimo di densità, ma non è certo la più adatta a fornire il valore numerico esatto della temperatura che vi corrisponde. Eppure tale valore è di grande importanza, poichè si è preso come peso *uno* quello di un centimetro cubo di acqua distillata al suo massimo di densità.

Despretz si è assicurato che l'acqua raggiunge il suo massimo di densità propriamente a 4°, facendo uso di un termometro riempiuto coll'acqua invece che col mercurio. Raffreddandolo gradatamente in un bagno di cui la temperatura era esattamente determinata, e tenendo conto della contrazione del vetro, egli trovò che a 4° avviene la massima contrazione dell'acqua, e per conseguenza a questa temperatura essa ha il massimo di densità.

201. **Densità dell'acqua alle diverse temperature.** — Nel caso dell'acqua non è più possibile ricorrere per la risoluzione dei vari problemi ai coefficienti medi di dilatazione, ma occorre far uso di curve o di tavole numeriche che forniscano, o il peso di un litro, o il volume occupato da un chilogrammo alle diverse temperature. E in vista del grande uso di questi dati riferiremo nella pagina seguente una tabella delle densità e dei volumi dell'acqua alle varie temperature, dovuta al Rossetti.

La tabella insegna, per esempio, che a 20° un litro di acqua pesa Kg. 0,998259, e un chilogrammo ha il volume di litri 1,001744.

Temperature	Densità	Volumi	Temperature	Densità	Volumi
— 10°	0,908 145	1,001 858	21	0,998 017	1,001 957
— 5	9 298	0 702	22	7 826	2 177
0	9 871	0 129	23	7 601	2 405
+ 1	9 828	0 072	24	7 367	2 641
2	9 969	0 031	25	7 120	2 888
3	4 991	0 009	26	7 866	3 144
4	1,000 000	1,000 000	27	6 603	3 408
5	0,999 990	0 010	28	6 331	3 682
6	9 970	0 030	29	6 051	3 965
7	9 933	0 067	30	5 765	4 253
8	9 886	0 114	35	4 18	5 86
9	9 824	0 176	40	2 35	7 70
10	9 747	0 253	45	0 37	9 71
11	9 655	0 345	50	0,988 19	1,011 95
12	9 549	0 451	55	5 82	4 39
13	9 430	0 570	60	3 38	6 91
14	9 299	0 701	65	0 74	9 64
15	9 160	0 841	70	0,977 94	1,022 56
16	9 002	0 999	75	4 98	5 66
17	8 841	1 160	80	1 94	8 87
18	8 654	1 348	85	0,968 79	1,032 21
19	8 460	1 542	90	5 56	5 67
20	8 259	1 744	95	2 19	9 31
			100	0,958 65	1,043 12

È facile intendere come si possa trar profitto della tavola per avere la capacità di un vaso ad una temperatura qualunque: basterà determinare il peso dell'acqua che lo riempie, e dividerlo pel peso di un litro. Si potrebbe all'uopo far uso anche del mercurio e ne abbiamo veduto un esempio descrivendo il dilatometro; ma quando si tratta di vasi di una certa capacità, il mercurio che ha il rilevante peso specifico 13,596, colla sua pressione idrostatica potrebbe deformare il recipiente e alterarne la capacità; e oltre a ciò sarebbe difficile di avere una bilancia abbastanza sensibile sotto un carico così forte.

205. **Correzione barometrica.** — Per misurare la pressione atmosferica con l'altezza di una colonna di mercurio che le fa equilibrio, bisogna riportare questo liquido a una temperatura determinata, e si prende per convenzione la temperatura di 0°; soltanto in questo modo le varie altezze barometriche sono paragonabili, in uno stesso luogo, fra di loro.

Il problema è pertanto codesto: l'altezza barometrica osservata a t essendo h_t, quale sarebbe l'altezza h_0 della colonna barometrica, se la temperatura fosse di 0°? Dicendo p_t e p_0 i pesi specifici del mercurio alle temperature t° e 0°, si ha:

$$\frac{h_0}{h_t} = \frac{p_t}{p_0} = \frac{1}{1 + \alpha t},$$

chiamando con α il coefficiente di dilatazione assoluta del mercurio. Si deduce che:

$$h_0 = \frac{h_t}{1 + \alpha t}. \tag{1}$$

Per tener conto della dilatazione della scala, osserveremo che ciascuna sua divisione è 1^{mm} alla temperatura di 0° (supponendo che il costruttore abbia eseguito la divisione alla temperatura normale); ciascuna divisione, in conseguenza, rappresenta a t° una lunghezza $1 + \lambda t$ millim., essendo λ il coefficiente di dilatazione lineare del metallo onde la scala è fatta. Le divisioni lette su essa, le quali rappresenterebbero h_t mill. alla temperatura di 0°, avranno a t° per lunghezza reale $h_t\,(1 + \lambda t)$ millim.; e quindi la (1) diventa:

$$h_0 = h_t \cdot \frac{1 + \lambda t}{1 + \alpha t}, \tag{2}$$

formula che contiene le due correzioni. Supposta la scala di ottone, a cui corrisponde il coefficiente di dilatazione lineare $\lambda = 0,000018$, e prendendo eguale a 0,000181 il coefficiente di dilatazione assoluta del mercurio, si ha con molta approssimazione:

$$h_0 = h_t - 0,000161\, h_t \,.\, t.$$

206. **Dilatazione termica dei gas.** — I gas sono, come si è detto parecchie volte, i corpi più dilatabili per il calore, e per essi la legge di dilatazione presenta una regolarità maggiore che pei solidi e pei liquidi.

Si può scaldare un gas e lasciarlo liberamente dilatare, mantenendone costante la pressione: ma si può invece impedire alla massa gassosa di espandersi, mentre la si riscalda; l'effetto del calore sarà allora un aumento di forza elastica o di tensione della massa gassosa. Nel primo caso si dice che il gas è scaldato a pressione costante, nel secondo a volume costante.

Volta e Gay-Lussac furono tra i primi a studiare con cura la dilatazione termica de' gas a pressione costante, e pervennero con le loro esperienze a questo risultato molto importante, che tutti i gas si dilatano egualmente; e assegnarono come coefficiente di dilatazione il numero 0,00375. Questa legge è notevole per la sua semplicità; ma Regnault e Magnus, perfezionando i metodi sperimentali, hanno successivamente constatato che: 1° il numero 0,00375 è troppo grande, e il vero valore del coefficiente di dilatazione dell'aria a pressione costante è: $\frac{1}{273} = 0,00367$; 2° questo coefficiente non è, a tutto rigore, indipendente dalla pressione e dalla temperatura; inoltre, sebben poco, varia da

gas a gas. Tuttavia, non tenendo conto delle piccole differenze, si potrà enunciare la legge della dilatazione termica de' gas così: *il coefficiente di dilatazione de' gas è lo stesso per tutti, a qualunque temperatura e pressione, ed è eguale a* 0,00367. Questa legge, come quella di Boyle, è una legge limite; entrambe cioè valgono con tutto il rigore soltanto per un *gas ideale*. Quanto ai gas reali, le due leggi valgono tanto più esattamente quanto più essi sono lontani dal punto di liquefazione.

Supposto pertanto costante il coefficiente di dilatazione dei gas, risolviamo ora il seguente problema: il volume di una massa gassosa a 0^0 è V_0; se si scalda a t^0 e si lascia liberamente dilatare, in modo che la pressione resti costante, quale sarà il suo nuovo volume?

Se s'indica con α il coefficiente di dilatazione, si avrà evidentemente:

$$V_t = V_0 + \alpha V_0 t = V_0 (1 + \alpha t).$$

Reciprocamente, supposto noto il volume V_t, si ha:

$$V_0 = \frac{V_t}{1 + \alpha t}. \tag{1}$$

Costringendo invece l'aeriforme ad occupare sempre lo stesso volume, mentre lo si scalda, aumenta la sua tensione: se indichiamo con H_0 la pressione alla quale il gas fu chiuso nel recipiente a 0^0, e con H_t quella che esso eserciterà dopo essere stato portato alla temperatura t, si dirà *coefficiente di tensione* la quantità

$$\alpha' = \frac{H_t - H_0}{t H_0}, \tag{2}$$

ossia l'aumento di pressione del gas per ogni unità e per ogni grado.

È facile vedere che, entro i limiti nei quali si verifica la legge di Boyle, il coefficiente di tensione α' ha lo stesso valore del coefficiente di dilatazione α. Difatti una massa aeriforme che a 0° e alla pressione H_0 ha il volume V_0, quando sia scaldata a t°, senza mutare la pressione, assume il volume

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t)$$

come si è detto. Ora se, senza variare la temperatura, con la sola compressione si riporterà il volume del gas a V_0, esso, per la legge di Boyle, acquisterà una tensione H_t, tale che sia:

$$H_t V_0 = H_0 V_t$$

ossia

$$H_t = H_0 (1 + \alpha t)$$

da cui per la (2)

$$\alpha = \frac{H_t - H_0}{H_0 t} = \alpha'.$$

Ma siccome la legge di Boyle non si verifica con tutto il rigore, e, d'altra parte, il significato de' due coefficienti è diverso, converrà distinguerli l'uno dall'altro.

207. **Problemi sulla dilatazione termica dei gas.** — Con questi dati e con la scorta delle leggi di Boyle e di Gay-Lussac, possiamo risolvere i seguenti altri problemi che spesso si presentano:

1.° Conoscendo il volume V_t d'una massa gassosa a t°, calcolare quello V_s a s°, rimanendo la pressione stessa.

Si trova prima il volume a 0°; moltiplicando poi questo volume per il binomio di dilatazione corrispondente, si ha:

$$V_s = \frac{V_t}{1 + \alpha t} (1 + \alpha s).$$

2.° Risolviamo ora il problema generale: il volume di una massa di gas alla temperatura t e alla pressione H è V; quale sarà il volume V' della stessa massa alla temperatura t' e alla pressione H'? — Vi sono qui due correzioni, una rispetto alla temperatura, e l'altra rispetto alla pressione. Troviamo prima quali sarebbero i volumi della massa gassosa data alla temperatura di 0°, e alle pressioni rispettive H e H': i volumi richiesti, applicando la (1), sono $\frac{V}{1+\alpha t}$ e $\frac{V'}{1+\alpha t'}$. Ora ricordando la legge di Boyle, sarà:

$$\frac{VH}{1+\alpha t}=\frac{V'H'}{1+\alpha t'}; \tag{3}$$

e poichè V, H, t sono qualunque, si vede che è costante per la stessa massa di gas la espressione

$$\frac{HV}{1+\alpha t}.$$

Indicando il valore della costante con C, si ha:

$$\frac{HV}{1+\alpha t}=C. \tag{4}$$

Questa eguaglianza è detta *l'equazione dello stato gassoso*: essa sarebbe rigorosa per un *gas perfetto*, cioè per un gas ideale a cui si applicassero esattamente le leggi di Boyle e di Gay-Lussac, delle quali è una conseguenza. Ma trattandosi de' gas reali, la (4) si applica con maggiore esattezza a quelli che, come l'idrogeno, l'aria, l'ossigeno, l'azoto, l'ossido di carbonio, meglio obbediscono alle dette leggi, vale a dire sono più lontani dalla liquefazione.

3.° Risolviamo anche quest'altra importante questione: il peso di un litro d'aria a 0° e alla pres-

sione normale dell'atmosfera di 76^{cm} di mercurio, fu trovato da Regnault a Parigi di $1^{gr},293187$: se si trascurano le piccole variazioni di gravità da un luogo all'altro, e si ritiene il detto numero eguale da per tutto a $1^{gr},293$ per limitarsi alla terza cifra decimale, quale sarà il peso di 1 litro d'aria a una temperatura t e a una pressione H qualunque?

Il peso di un litro d'aria alla temperatura t e alla pressione normale è $\frac{1^{gr},293}{1+\alpha t}$ indicando con α il coefficiente di dilatazione dell'aria: e poichè la densità, e quindi il peso di una massa gassosa, è in ragione diretta della pressione, il peso P di un litro a t^0 e alla pressione H si ottiene moltiplicando l'espressione suddetta per il rapporto diretto delle pressioni. Si ha cioè:

$$P = \frac{1^{gr},293}{1+\alpha t} \cdot \frac{H}{76} \cdot \tag{5}$$

Volendo esprimere le pressioni H in chilogrammi sopra un metro quadrato, anzichè in centimetri di mercurio, il numero 76 in questa formula viene sostituito con l'altro 10333 che in Kg. misura la pressione normale dell'atmosfera sopra 1^{m^2}. È poi ovvio che volendo il peso di v litri di aria nelle dette condizioni, basterà moltiplicare il 2° membro per v.

4.° Ricordiamo che la *densità di un gas riferita all'aria* è il rapporto fra il peso di un volume qualunque del gas e quello di un egual volume d'aria, alle stesse condizioni di temperatura e pressione. — Ora è chiaro che la densità relativa così definita è indipendente dalle condizioni di temperatura e di pressione per quei gas ai quali, come l'aria, si applica la legge caratteristica dello stato gassoso, giacchè le densità assolute (massa dell'unità di vo-

lume) variano nello stesso rapporto. Ciò posto, indicando con P' il peso di v litri di gas a t^0 e alla pressione H, e con P il peso di un egual volume di aria nelle stesse condizioni, si ha per definizione che la densità δ del gas relativa all'aria è:

$$\delta = \frac{P'}{P};$$

valendoci della (5), e ricordando che si tratta di v litri:

$$(6) \qquad \delta = \frac{P'(1 + \alpha t) \,.\, 76}{1^{gr},293 \,.\, H \,.\, v} \,.$$

Questa relazione contiene cinque variabili; se si danno i valori di quattro, la quinta si trova facilmente; essa serve quindi alla soluzione di molte quistioni relative ai gas.

208. — **Altra forma dell'equazione caratteristica dei gas; temperature assolute.** — Se nella equazione caratteristica de' gas $\frac{V H}{1 + \alpha t} = C$, poniamo per α il suo valore, si ha:

$$(1) \qquad \frac{V H}{273 + t} = \frac{C}{273} = R,$$

essendo R una nuova costante.

Le temperature ordinarie in gradi centigradi aumentate di 273° sono dette *temperature assolute:* ciò equivale a trasportare lo zero ordinario di 273° più in basso del punto di fusione del ghiaccio: questo nuovo punto è detto *zero assoluto* (§ 209). Le temperature assolute s'indicano comunemente colla lettera T; si ha cioè:

$$273 + t = T.$$

La equazione caratteristica de' gas assume allora la forma:

$$\frac{VH}{T} = R. \tag{2}$$

Se la massa del gas è eguale all'unità, V è detto *volume specifico*.

La costante R è la medesima per la stessa massa di gas, qualunque siano i valori di V, H, T; il valore numerico di R dipende dalla massa del gas e dalle unità scelte per la misura delle dette variabili. Supponiamo la massa del gas eguale a 1 Kg., e valutiamone il volume in metri cubi, la pressione in chilogrammi sopra un metro quadrato: calcoliamo, come esempio, il valore di R per l'idrogeno.

Supposto il gas nelle condizioni normali di temperatura e di pressione, si ha:

$$V = \frac{1 \text{ Kg.}}{0{,}0896}$$
$$T = 273$$
$$H = 10333 \text{ Kg.},$$

sostituendo nella (2), si ottiene $R = 423$. Per l'aria, ripetendo lo stesso calcolo, si ha $R = 29$; con eguale procedimento si calcola la costante per gli altri gas.

Determinato il valore R, si trova subito una delle tre variabili H, V, T quando sono date due di esse.

Conoscendosi poi la densità assoluta d di un gas, si può subito determinare la sua costante; si ha difatti:

$$R = \frac{H}{T} \cdot V = \frac{H}{Td} \cdot$$

209. **Zero assoluto.** — Riprendiamo l'equazione del gas perfetto sotto la forma:

$$(1) \qquad H\,V = C\,(1 + \alpha\,t).$$

Se in questa si pone

$$1 + \alpha\,t = 0, \text{ ossia } t = -\frac{1}{\alpha} = -273^0,$$

essa fornisce $H\,V = 0$; e poichè non si può concepire materia che non occupi spazio, si dovrà ritenere che a — 273° la pressione sia zero. Ora ricordando che la pressione esercitata dai gas dipende dalla loro forza viva molecolare, dovremo conchiuderne che, ammessa l'esistenza di una sostanza caratterizzata dalla (1), alla temperatura di — 273° ogni forza viva delle molecole sarebbe spenta, e perciò codesta temperatura coincide collo *zero assoluto*; sarebbe assurdo supporre una temperatura inferiore a questa, in cui il corpo è privo di ogni calore. Nella scala delle temperature assolute non vi sono temperature negative.

210. **Termometro normale.** — Dopo questo studio sulla dilatazione dei diversi corpi, giova ritornare agli strumenti impiegati per la misura delle temperature.

Abbiamo detto le ragioni per cui nella pratica si dà la preferenza al termometro a mercurio; il male però è che i varii termometri a mercurio non vanno d'accordo fra di loro. Ciò non dipende dalle varie dimensioni loro che potranno influire soltanto su la prontezza e la sensibilità, ma dipende dalla *legge di dilatazione del vetro,* diversa da una specie all'altra.

Regnault ha comparato, a tale riguardo, fra di loro molti termometri a mercurio fatti con diverse

specie di vetro: fra 0° e 100° non presentavano che lievi differenze, di 0°,3 tutto al più; ma alle temperature superiori a 100°, queste differenze potevano divenire considerevoli e raggiungere qualche grado.

Minori sono le correzioni da apportare ai termometri a mercurio fatti con il vetro normale di Jena, per ridurre le loro indicazioni a quelle del termometro ad aria; secondo Wiebe e Böttcher, ecco le dette correzioni:

Riduzione al termometro ad aria del termometro a mercurio nel vetro normale di Jena (secondo Wiebe e Böttcher).

Temperat. letta	Correzione	Temperat. letta	Correzione	Temperat. letta	Correzione
— 20°	+ 0,153	+ 90°	— 0,028	+ 200°	+ 0,04
10	+ 0,067	100	0,000	210	0,11
0	0,000	110	— 0,03	220	0,21
+ 10	— 0,049	120	0,05	230	0,32
20	83	130	0,07	240	0,46
30	103	140	0,09	250	0,63
40	110	150	0,10	260	0,82
50	107	160	0,10	270	1,05
60	96	170	0,08	280	1,30
70	78	180	0,06	290	1,58
80	— 0,054	190	0,02	300	+ 1,91

I numeri posti nelle colonne *correzioni* devono, secondo il segno + o —, essere aggiunti o tolti alle temperature indicate dal termometro a mercurio per ottenere quelle del termometro ad aria.

Se si vuole essere esatti, è dunque impossibile di definire la scala pratica delle temperature con il termometro a mercurio, e s'impone l'uso del termometro ad aria.

Si può sperimentare in due modi diversi: a volume costante, ovvero a pressione costante. Nel primo caso si ritengono gli aumenti di tempera-

tura proporzionali agli aumenti di forza elastica dell'aria chiusa nel pallone, ossia si ritiene costante il coefficiente di tensione α'; nel secondo si suppone invece la temperatura proporzionale alla dilatazione della massa d'aria, ossia si ritiene costante α. Ora le due convenzioni coinciderebbero solo esattamente quando si avesse un gas perfetto, pel quale sarebbe $\alpha = \alpha'$; ma pei gas reali, volendo il massimo rigore, non è indifferente sperimentare nell'un modo o nell'altro.

Tuttavia le differenze sono piccolissime, anche usando diversi gas, sempre però che siano difficili a liquefarsi; a ogni modo, per non ingenerare dubbi, si è convenuto di dare la preferenza al metodo di scaldare il gas (aria o idrogeno) a volume costante. In tal caso dalla equazione

$$H\,V = R\,T$$

si ha subito:

$$T = \frac{V}{R} . H = K . H,$$

ossia la temperatura assoluta del gas è esattamente proporzionale alla sua tensione. Quando non occorre una estrema esattezza, si trascura la dilatazione del palloncino che contiene il gas, la quale è ben piccola rispetto alla dilatazione di questo; allora la costante K si determina molto facilmente, misurando la pressione che esercita il gas alla temperatura T di 273°, quella cioè del ghiaccio fondente.

Un apparecchio spesso usato è quello della figura 222 ideato dal Jolly.

211. **Termometro a gas.** — Lo strumento si compone di un palloncino L di vetro; e quando si tratta di temperature molto elevate, il palloncino si sostituisce con un serbatoio ovoidale di

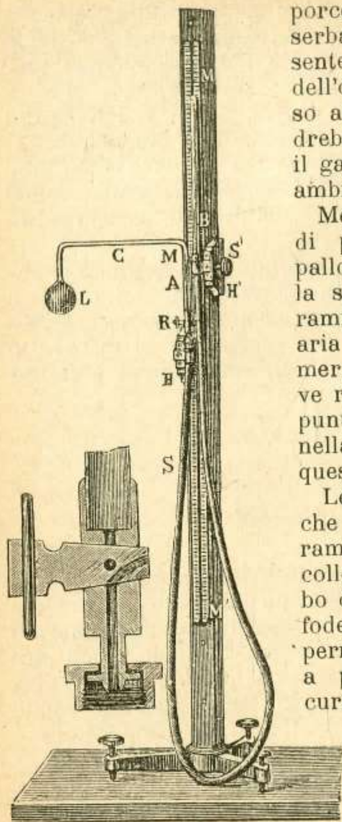


Fig. 222.

porcellana verniciata: un serbatoio di platino presenterebbe il fenomeno dell'occlusione, e attraverso alle sue pareti accadrebbe uno scambio fra il gas interno e il mezzo ambiente.

Mediante un cannello *C* di piccolissimo foro, il palloncino comunica con la sommità *A* d'uno dei rami d'un manometro ad aria libera; il livello del mercurio nelle letture deve ridursi a toccare una puntina di smalto saldata nella parete interna di questo ramo.

Le canne di vetro *A* e *B* che costituiscono i due rami del manometro sono collegate da un lungo tubo di caucciù *S* flessibile, foderato di tela forte; ciò permette di poter fissare a piacere, mediante il cursore *H*, l'altezza del palloncino; e, stabilita questa, permette anche di potere col mezzo dell'altro cursore *H'* regolare il livello del mercurio nel ramo chiuso, sino a toccare la puntina di smalto. Il regolo a cui sono addossate le canne, porta una

scala incisa sulla faccia posteriore di una lastra da specchi, che riflette la imagine della canna e il menisco del mercurio. Tenendo l'occhio in modo che una divisione della scala si trovi sulla visuale condotta per la sommità del menisco e della sua imagine riflessa, si evita l'errore di parallasse. La chiavetta *R* alla quale superiormente è masticciato il recipiente *L C M A*, rappresentata in maggiori proporzioni a parte, permette di aggiungere nuovo mercurio per la canna *B* aperta in cima, o estrarre quello eccedente girandola come è indicato nella figura.

Con questo strumento si opera a volume costante: il serbatoio di aria, o di idrogeno, o di altro gas ben secco, vien circondato di ghiaccio a 0°, e si porta il livello del mercurio nel ramo chiuso a contatto della punta di smalto: facendo le letture del manometro e del barometro, si ha la pressione a 0° del gas termometrico. Poi si immerge il serbatoio nel fluido di cui si vuol conoscere la temperatura, e s'impedisce la dilatazione del gas coll'innalzare il cursore *H'* provveduto a tal fine di una vite a scrupolo per i piccoli movimenti; in ogni lettura si fa in modo che il livello del mercurio affiori alla punta di smalto, e si determina la pressione del gas termometrico alla temperatura incognita *T*.

212. **Densità dei gas relativa all'acqua.** — Al § 121 abbiamo riferito le densità di alcuni gas relative all'aria: ora definendo per peso specifico dell'aria rapporto all'acqua nelle condizioni normali il quoziente del peso di un litro d'aria a 0° e sotto la pressione di 76 cm. di mercurio, per il peso di un litro d'acqua a 4°, si vede che esso è dato con grande approssimazione dal rapporto: $\frac{1,293}{1000} = 0,001293.$

I pesi specifici degli altri gas per rapporto all'acqua nelle condizioni normali di temperatura e pressione, si ottengono moltiplicando per questo numero le loro densità relative all'aria.

L'impiego nei calcoli del peso specifico dei gas relativo all'acqua, offre il vantaggio di dare immediatamente il peso d'un litro del gas che si considera nelle condizioni normali. Per esempio, se si moltiplica il numero 0,0693 che è la densità dell'idrogeno relativa all'aria, per il suddetto numero 0,001293 che è il peso specifico dell'aria relativo all'acqua nelle condizioni normali, il prodotto 0,0000896 è il peso espresso in chilogrammi d'un litro d'idrogeno pure nelle condizioni normali. È poi evidente che, mentre la densità d'un gas relativa all'aria non dipende dalle condizioni di temperatura e di pressione, la sua densità relativa all'acqua presa a 4° varia invece con la temperatura e la pressione. Lo stesso dicasi del peso specifico.

213. **Calore specifico dei gas a pressione costante e a volume costante.** — Il metodo delle mescolanze opportunamente modificato, venne anche impiegato a determinare il *calore specifico dei gas.* Molti fisici si occuparono del problema, fra gli altri Regnault che, al solito, ne perfezionò i metodi. Non possiamo entrare nella descrizione delle esperienze; dovremo contentarci di far conoscere soltanto il principio su cui esse erano fondate, e di darne i risultati. Un gas uscendo da un gazometro si scaldava nel passare lentamente in un lungo serpentino circondato da acqua calda, assumendone la temperatura. Da questo primo apparecchio il gas andava poi a circolare in un secondo serpentino contenuto in un calorimetro con acqua fredda, ove cedeva in parte il proprio calore. Si misuravano il

volume del gas passato pel calorimetro e la sua temperatura all'entrata e all'uscita; conoscendo inoltre la sua densità, si avevano tutti gli elementi necessari per calcolare la quantità di calore ceduta da una massa nota del gas quando si raffreddava di un grado, e quindi il suo calore specifico. Ma qui si rendevano indispensabili molte correzioni relative all'influenza del mezzo ambiente, e si trattava di correzioni notevoli a cagione della piccola massa del gas che passava nel calorimetro, e della lunga durata delle esperienze.

Il calore specifico così ottenuto è il *calore specifico a pressione costante:* difatti la pressione del gazometro non è che di pochissimo superiore a quella dell'atmosfera o dell'ambiente nel quale il gas sfugge all'uscita dal calorimetro; essa cioè è quella richiesta perchè si stabilisca una lenta e uniforme corrente di gas. Questo quindi si dilata liberamente sotto una costante pressione, e il calore specifico ottenuto è il calore specifico a pressione costante, come si è detto. Ma il calore specifico di un gas può essere preso altrimenti: si può cioè impedire al gas di dilatarsi mantenendolo sotto volume costante, malgrado le variazioni di temperatura. La quantità di calore necessaria per elevare di 1° la temperatura di un chilogrammo di gas in queste altre condizioni è detta *calore specifico a volume costante.*

La misura sperimentale diretta del calore specifico a volume costante è assai difficile a farsi; indirettamente il suo valore si ottiene, per un gas qualunque, da diverse formule, da quella, per esempio, che dà la velocità di propagazione del suono nell'aeriforme. Tale formula è (§ 149):

$$v = \sqrt{\frac{e}{d} \cdot \frac{c_p}{c_v}}$$

essendo e l'elasticità, d la densità del gas, c_p il suo calore specifico a pressione costante e c_v il calore specifico a volume costante. Ora la velocità v del suono si determina sia col metodo delle interferenze, sia in altro modo: conoscendosi inoltre il modulo e di elasticità e la densità d dell'aeriforme, si vede subito come la detta relazione fornisca il valore $\frac{c_p}{c_v}$: e se c_p è dato dall'esperienza, se ne ricava il valore di c_v.

Una volta determinata la quantità di calore necessaria per riscaldare di 1°, a pressione costante o a volume costante, un chilogrammo dei vari gas, moltiplicando tali valori per le rispettive densità si ottengono i corrispondenti *calori specifici a volume*, i quali indicano quante calorie sono necessarie a riscaldare di 1° l'unità di volume dei varii aeriformi.

La tabella che segue contiene alcuni risultati delle esperienze di Regnault.

Calori specifici di alcuni gas (acqua = 1).

GAS	A press. costante		A vol. costante		Rapporto $\frac{c_p}{c_v}$
	a peso 1 Kg.	a volume 1 litro	a peso 1 Kg.	a volume 1 litro	
Aria atm.	0,23741	0,00030614	0,16847	0,00021786	1.4098
Azoto . .	0,24380	0,00030625	0,17263	0,00021697	1,4144
Ossigeno	0,21751	0,00031099	0,15506	0,00022171	1,4026
Idrogeno	3,40900	0,00030533	2,41216	0,00021605	1,4126

Si vede dalla tavola che per quei gas che sono più lontani dalla liquefazione, i *calori specifici a volume,* sia a pressione costante che a volume costante, sono quasi gli stessi per tutti; il che significa che, entro certi limiti, tali gas richiedono eguali quantità di calore per dilatarsi egualmente sotto pressione costante; ovvero, se scaldati a volume costante, richiedono sensibilmente la medesima quantità di calore per scaldarsi egualmente.

214. **Come si riparte la quantità di calore fornita a un corpo.** — Il calore specifico a volume costante è minore di quello a pressione costante, e la ragione è evidente, giacchè quando il gas scaldato si espande deve compiere un lavoro per vincere la pressione esterna, e bisogna quindi fornirgli del calore per tale lavoro.

In generale, il calore fornito ad un corpo può produrre quattro effetti distinti:

1.° Compie un lavoro esterno, perchè il corpo nel dilatarsi vince per un certo spazio la pressione che sopporta la sua superficie: quando altre pressioni non sussistano, si suppone esservi quella dell'atmosfera.

2.° Eseguisce un lavoro interno, perchè col dilatarsi del corpo le molecole si allontanano le une dalle altre; e per questo è necessario che sia vinta in parte la reciproca attrazione (coesione), e ne risulta un aumento di energia potenziale.

3.° Aumenta la temperatura, ossia la forza viva molecolare.

4.° Accresce l'energia degli atomi nelle molecole.

L'intensità relativa di tali effetti varia poi secondo la natura dei corpi: nei solidi la maggior parte del calore fornito è impiegato nel lavoro di allontanare le molecole vincendo la coesione, mentre il

lavoro esterno è piccolissimo; nei gas avviene il contrario.

L'acqua scaldata fra 0° e 4° si contrae invece di dilatarsi; ciò vuol dire che in questo caso il lavoro esterno dovuto al calore è negativo.

Il ghiaccio alla temperatura di 0° si liquefa; la sua temperatura resta costante durante la fusione, qualunque sia il calore aggiunto, e nel medesimo tempo la massa si contrae liquefacendosi. In tal caso ogni effetto del calore fornito si riduce al lavoro interno del disgregamento molecolare e ad un lavoro esterno negativo, il riscaldamento essendo nullo.

Abbiamo citato questi esempi unicamente per dimostrare che gli accennati effetti, ai quali dà luogo la comunicazione di calore, variano secondo i corpi, e possono essere negativi, nulli o positivi.

215. **Fusione e solidificazione.** — Quando si fornisce calore ad un corpo, non solo aumentano le distanze fra le molecole, ma le vibrazioni molecolari ed atomiche diventano più ampie e più rapide; onde avviene che la coesione ne resta svigorita, e se il calore è sufficiente, i solidi si liquefano e i liquidi si vaporizzano.

Si dice *fusione* il passaggio di un solido allo stato liquido per somministrazione di calore; viceversa, *solidificazione* il passaggio di un liquido, sufficientemente raffreddato, allo stato solido.

La temperatura alla quale un solido si liquefa è detta *punto di fusione;* quella alla quale un liquido si solidifica, *punto di solidificazione.*

L'esperienza prova che, in generale, il punto di fusione coincide col punto di solidificazione, e che varia poco con la pressione.

Si dicono *refrattari* quei corpi che richiedono temperature elevatissime per liquefarsi; ma perfezio-

nandosi i mezzi per produrre alte temperature, è andato sempre più diminuendo il numero dei solidi non liquefatti.

Certi solidi però, quando sono scaldati, anzichè liquefarsi, si decompongono. Così scaldando a sufficienza un pezzo di legno in vaso chiuso, fuori del contatto con l'aria, esso non si liquefa; ma quando si è raggiunta una certa temperatura, si decompone, dando luogo a carbone e a sostanze liquide e gasose, il legno cioè subisce la *distillazione*. Invece tutti i liquidi possono solidificarsi, se vengono sufficientemente raffreddati; per alcuni, come p. es. l'alcool, l'etere, bisogna arrivare a temperature bassissime, che si ottengono nel modo che vedremo.

Quando si scalda un solido, la sua temperatura da prima va aumentando finchè si sia raggiunto il punto di fusione: durante la fusione poi, mentre sono a contatto il solido e il liquido, la temperatura rimane stazionaria; indi questa riprende a salire quando il solido si sia tutto liquefatto. Il calore fornito durante la fusione serve dunque unicamente a fare il lavoro interno della disaggregazione molecolare, ed è detto *calore di liquidità o di fusione*.

Per alcuni solidi, come per esempio il ghiaccio, il passaggio dallo stato solido al liquido, e viceversa dallo stato liquido a quello solido, è molto netto; il punto di fusione si determina allora con precisione. Tale comportamento è seguito soltanto da quelle sostanze chimicamente ben definite, che sono suscettibili di cristallizzazione.

Per i corpi non cristallini invece, il passaggio da uno stato all'altro è graduale; il punto di fusione si determina in tal caso più difficilmente. Essi prima di passare allo stato di fluidità completa, attraversano stati di diversa pastosità; si rammolliscono cioè gradatamente ed assumono l'apparenza di li-

quidi più o meno vischiosi. La fusione in tal caso è detta *pastosa*.

Il diagramma della fig. 223 rappresenta il contegno di un solido che, come il ghiaccio, ha un punto di fusione ben netto, contando il calore fornito sulla retta OC, e le temperature che ne risultano sulle perpendicolari alla linea OC nei punti corrispondenti. La fusione comincierà nel punto M, dopo aver somministrato la quantità di calore OA e aver raggiunto la temperatura di fusione $\theta = AM$. Questa rimarrà costante durante la fusione fino in N, quando il solido si sarà tutto liquefatto e

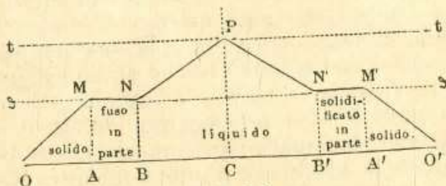


Fig. 223.

avrà ricevuto il calore di fusione AB. Poi la temperatura salirà ancora, fino a un valore $t = CP$. Se al liquido che si trova a tale temperatura si comincia a sottrarre calore, la temperatura scenderà gradatamente fino a quella θ di fusione, e allora, se non accade il fenomeno della soprafusione (§ 219), il liquido comincia a solidificarsi; e durante la solidificazione la sostanza cederà il calore di fusione, nel mentre la temperatura rimarrà costante. Finalmente, compiuta la solidificazione, la temperatura scenderà gradatamente fino alla temperatura iniziale.

In questo caso la linea $PN'M'O'$ che rappresenta il raffreddamento sarebbe simmetrica di quella

ONMP che rappresenta il riscaldamento. E la simmetria si verifica anche nella figura 224 che rappresenta il contegno della cera, nella quale la fusione propriamente detta è preceduta da un periodo di rammollimento.

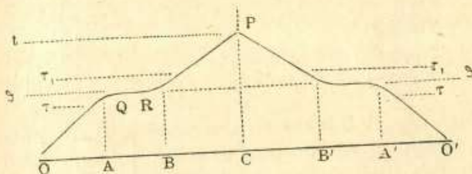


Fig. 224.

216. **Leggi della fusione.** — Riassumendo, potremo enunciare le leggi che governano la fusione:

1.° *Ogni solido si liquefa ad una determinata temperatura che varia assai poco con la pressione; la temperatura di fusione poi è quella stessa alla quale il liquido raffreddato si solidifica.*

2.° *Durante la fusione, la temperatura resta costante:* il calore fornito è impiegato nel lavoro interno del disgregamento molecolare.

Nella tavola qui sotto sono riportati i punti di fusione di alcune sostanze:

	Punti di fusione in gradi C°
Anidride carbonica	— 116
Mercurio	— 39
Ghiaccio	0
Fosforo	+ 44
Paraffina	46
Cera bianca	64
Acido stearico	70
Zolfo	110

	Punti di fusione in gradi C°
Stagno	233
Piombo	334
Antimonio	433
Argento	954
Oro	1045
Rame	1055
Ferro	1600
Acciaio	1350

Il platino si liquefa a una temperatura elevatissima, che non si sa ben precisare; pare che essa non sia molto lontana da 1780°. Il carbone è ancor più restio, poichè anche nei forni più roventi si mantiene solido; nessuno difatti avrà mai visto che esso sia colato fuso attraverso le griglie dei forni.

217. **Calore di fusione del ghiaccio.** — Per verificare col ghiaccio le suddette leggi, prendiamone un poco raccolto all'aperto in rigido verno, e quindi molto freddo, e, dopo averlo frantumato, involgiamo con esso il bulbo di un termometro. Supponiamo che questo segni la temperatura di — 10°. Rechiamo il tutto in una camera tiepida: la temperatura andrà elevandosi nel ghiaccio come in ogni altro corpo solido posto in simili circostanze, sino a giungere allo 0°; ma pervenuta a tal punto, essa si fermerà e non passerà oltre, fino a che rimarrà del ghiaccio solido in mezzo al liquido involgente il termometro.

Il calore fornito dall'ambiente ha dunque servito prima a portare la temperatura del ghiaccio da — 10° a 0°; a questo punto è cominciata la fusione, e il calore indi ha servito unicamente a liquefare il ghiaccio, poichè si richiede un consumo di energia termica a vincere la coesione delle molecole, a disgregarle, e renderle scorrevoli facilmente le une

su le altre, come lo sono nell'acqua. Talchè, fino a quando il ghiaccio non siasi tutto fuso, l'acqua non oltrepasserà la temperatura di 0°. La fusione è pertanto un lavoro fatto dal calore, e l'esperienza prova che per liquefare un chilogrammo di ghiaccio si richiedono 80 calorie circa; questa rilevante quantità di calore è dunque il *calore di fusione del ghiaccio*.

218. **Influenza della pressione sul punto di fusione; caso dell'acqua, rigelo.** — Quanto all'influenza della pressione sul punto di fusione, essa non si rende sensibile che per notevoli variazioni della pressione stessa. In generale, *un aumento di pressione abbassa il punto di fusione per quelle sostanze che diminuiscono di volume passando allo stato liquido* (ghiaccio), *e lo innalza per quelle che invece si espandono nel passaggio medesimo* (spermaceti).

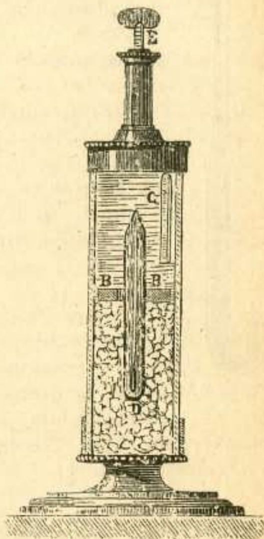


Fig. 225.

L'abbassamento del punto di fusione del ghiaccio fu verificato da Sir W. Thomson con un apparecchio rappresentato dalla fig. 225. In fondo a un cilindro dalle grosse pareti di vetro vi ha del ghiaccio, trattenuto in basso da un disco di piombo *B B;* il resto della capacità è riempito con acqua. Una campanetta *C* piena d'aria fa da manometro ad

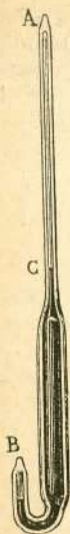


Fig. 226.

aria compressa, e indica la pressione che si esercita girando la vite *E;* un termometro protetto da una camicia di vetro segna la temperatura. W. Thomson trovò così che il ghiaccio fonde a — 0°,129 sotto 17 atmosfere; e da numerose esperienze ha dedotto che, ad ogni aumento di un'atmosfera di pressione, corrisponde un abbassamento di 0°,0074 nel punto di fusione.

L'innalzamento del punto di fusione dello spermaceti e della paraffina fu verificato invece con l'apparecchio della fig. 226; esso consiste in un tubo di vetro a pareti molto grosse contenente in *B* la sostanza da cimentare, poi mercurio fino in *C*, ad aria nella parte capillare fino ad *A*.

Il mercurio immerso più o meno in un bagno caldo, si dilata ed esercita una forte pressione sulla sostanza racchiusa in *B*, la quale si deduce dal volume dell'aria come in un manometro ad aria compressa. Così furono determinati dal Bunsen i seguenti numeri:

	Pressione in atmosfere	Punto di fusione
Spermaceti	1	47°,7
	96	49°,7
	156	50°,9
Paraffina	1	46°,3
	85	48°,9
	100	49°,9

219. **Aumento di volume dell'acqua nell'atto della sua congelazione. Rigelo.** — L'aumento di volume che presenta l'acqua nell'atto di congelarsi è notevole: il peso specifico del ghiaccio a 0° è 0,918, mentre quello dell'acqua alla stessa temperatura è 0,9998; ciò spiega il galleggiamento del ghiaccio sull'acqua.

Essendo poi grandissima la forza di espansione del ghiaccio nel momento della sua formazione, succede che i vasi pieni d'acqua e chiusi si rompono quando questa si solidifica. Belle sono le esperienze del William per mettere in evidenza la enorme pressione esercitata dall'acqua nel congelarsi: delle bombe piene di acqua, esposte d'inverno a freddi intensi, si spaccano nell'atto della formazione del ghiaccio. Questa esperienza prova inoltre che l'acqua, sotto grandi pressioni, si mantiene liquida a temperature ben inferiori a 0°.

Volendo ripetere l'esperienza del William, si faccia prima bollire un po' di acqua per scacciarne l'aria, e poi, circondandola di ghiaccio, la si lasci raffreddare sin verso i 4°; indi si riempia con essa una bomba di ferro e si chiuda il foro con una vite. Immergendo la bomba in un miscuglio frigorifero fatto con neve e sale, essa, in breve, si rompe con forte rumore per l'enorme pressione dell'acqua; questa, allora, potendosi espandere, congela.

L'aumento brusco di volume che subisce una massa d'acqua nell'atto della solidificazione, è dovuto al fatto che le sue molecole si aggregano le une alle altre per formare de' minutissimi cristalli esagonali disposti per lo più in forma di stella. Si comprende così che le molecole, nell'assumere questa disposizione simmetrica, devono occupare uno spazio maggiore, e perciò si verifica un subitaneo incremento di volume.

Quando i fiocchi di neve si formano in un'atmosfera relativamente tranquilla, risultano di piccoli cristalli come quelli rappresentati dalla fig. 227;

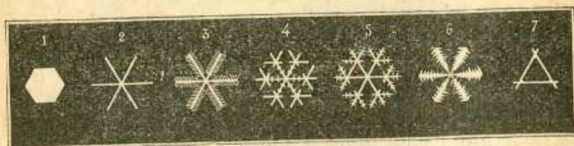


Fig. 227.

essi hanno forme perfettamente simmetriche, e si aggruppano sempre tra loro sotto angoli di 60° o di 120°: si può osservarli bene, accogliendoli su un panno nero e freddo, e aiutando l'occhio con una lente.

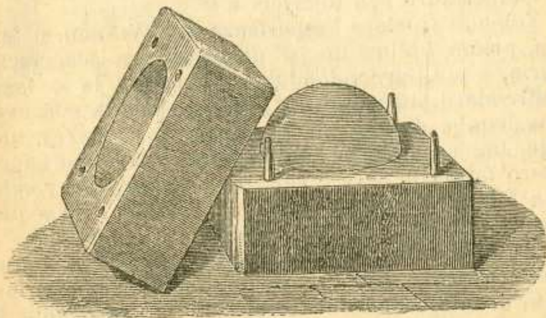


Fig. 228.

Con l'influenza della pressione sul punto di fusione del ghiaccio, si spiegano alcuni curiosi esperimenti del Tyndall. Se fra due forme di bosso, aventi una cavità di forma determinata quando esse

combaciano, si pongono pezzi di ghiaccio, e si comprime fortemente con un torchio idraulico, si ottiene un solido di ghiaccio, limpido, modellato sulla cavità: si può così ottenere una sfera, una lente, ecc., di ghiaccio (fig. 228).

Questo fenomeno del ghiaccio di assumere il contegno di un corpo plastico, è detto *rigelo*. La plasticità però non è che apparente: sotto la pressione il ghiaccio si frantuma, e i frammenti premendosi l'un l'altro fondono in parte; l'acqua della fusione riempie gl'interstizi tra i frammenti, e sfuggendo alla pressione rigela: così essa salda insieme i vari pezzi formando con questi una massa omogenea. Pure con l'abbassamento del punto di fusione del ghiaccio dovuto alla pressione, si spiega l'esperienza seguente. Appoggiando a due sostegni un pezzo di ghiaccio, e ponendogli a cavalcioni un filo metallico teso da pesi, si vedrà il filo passare attraverso il ghiaccio senza dividerlo in due; la traccia del passaggio sarà indicata soltanto dalla diversa disposizione delle bollicine di aria (fig. 229).

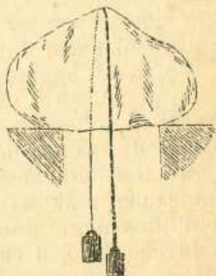


Fig. 229.

Si spiega presso a poco nello stesso modo il fenomeno presentato dai ghiacciai che scendono lentamente modellandosi sulle vallate, come se fossero di sostanza pastosa.

220. **Solidificazione.** — Abbiamo detto che un liquido raffreddato sufficientemente finisce per solidificarsi; è il fenomeno inverso della fusione, e le leggi che lo governano sono le medesime: 1° *la solidificazione, sotto una pressione determinata, si*

produce sempre, per lo stesso corpo, a una temperatura fissa che è esattamente quella della sua fusione; 2° durante la solidificazione, la temperatura del corpo non varia.

Quei corpi che dallo stato solido passano allo stato liquido con un rammollimento progressivo, ripassano inversamente per i medesimi stati quando da liquidi tornano a solidificarsi (fig. 223).

Nell'atto poi della solidificazione il liquido restituisce tutto il calore assorbito durante la fusione; ciò spiega, per esempio, il raddolcirsi della temperatura dell'aria durante una nevicata.

Vogliamo aggiungere brevi parole intorno ad alcuni pochi corpi che nel passaggio dallo stato liquido al solido cambiano, come fa l'acqua, *notevolmente* di volume: la ghisa, il bismuto, l'argento, nell'atto di solidificarsi, aumentano bruscamente di volume; perciò il ferro liquido, per esempio, quando si solidifica in uno stampo, riempie tutti i cavi di questo.

Invece l'oro, il rame, lo zolfo, e quasi tutte le sostanze più comuni, si contraggono nel solidificarsi, e non si prestano a riempire i vuoti di una forma. Per questa ragione la coniazione delle monete d'oro e di rame non può farsi con la fusione, ma bisogna stamparle allo stato solido con appositi conii che vengono compressi fortemente contro le loro opposte faccie.

221. **Soprafusione.** — Accade bene spesso che, raffreddando una sostanza liquida, essa si mantenga in tale stato al disotto del punto di fusione: una condizione però necessaria per questo fenomeno, detto di *soprafusione*, è che il liquido sia lasciato nella massima quiete. L'iposolfito di sodio, che fonde a 48°, è una sostanza che si presta facilmente a mostrare questo interessante fatto; il salolo presenta il fenomeno in modo ancora più

cospicuo; esso si liquefa a una temperatura poco elevata, e per osservare il fenomeno basta fonderne un poco su una lastra di vetro. Anche l'acqua, sebbene più difficilmente, può trovarsi nello stato di soprafusione. In ogni caso poi, agitando la massa, ovvero anche facendo cadere in essa un cristallino della stessa sostanza, il liquido in istato di soprafusione si solidifica, ed un termometro che vi si trovasse immerso risalirebbe subito al punto di fusione; ciò prova che anche in questo caso il punto di solidificazione è lo stesso di quello di fusione.

222. **Soluzione; calore di soluzione, calore di diluizione.** — La soluzione di un solido in un liquido è anch'essa un passaggio dal primo al secondo stato di aggregazione; e il lavoro del disaggregamento molecolare deve dar luogo ad un consumo di calore, come accade nella fusione. Siffatto consumo di calore sarà tanto maggiore, quanto maggiore è la coesione che unisce fra loro le molecole del solido; inoltre queste, una volta separate, si diffondono nel solvente, ed anche questo movimento implica un lavoro ed un corrispondente consumo di calore. Possiamo così conchiudere che il consumo di calore che avviene in una soluzione si compone di due parti distinte: l'una riguarda il disaggregamento del solido, ed è detta *calore di soluzione*; essa è il calore di liquidità necessario pel cambiamento di stato: l'altra che riguarda il trasporto delle molecole disaggregate nel liquido, per cui esse acquistano un aumento di energia potenziale, e si chiama *calore di diluizione;* questo calore aumenta, fino a un certo limite, con la quantità del solvente.

Tali quantità di calore dipendono quindi non solo dalla natura del solido e del solvente, ma anche dalle loro proporzioni.

Per osservare il raffreddamento che si produce durante la soluzione di un solido, basta prendere un po' di acqua in un bicchiere e porvi un termometro; quando esso ha assunto la temperatura dell'acqua, si versa in questa un sale qualunque, per esempio sale da cucina, o, meglio ancora, nitrato ammonico: si vedrà allora il termometro rapidamente discendere.

223. **Soluzioni sature, non sature, soprassature.** — Ricordiamo ora quanto si è detto al § 24. Se in un liquido (il solvente) mettiamo, a temperatura costante, quantità crescenti di un solido atto a disciogliersi, si osserva che la soluzione non può contenere più di una certa quantità del solido (il soluto) per un determinato peso del liquido. Quindi, se il solido è in quantità maggiore, l'eccesso non si scioglie, e la soluzione si dice *satura.* Si trova poi che la quantità di solido necessaria a saturare un determinato peso del liquido varia con la temperatura, e in generale aumenta con essa.

Quando poi una soluzione, a una determinata temperatura, non contiene tutto il soluto necessario alla saturazione, si dice che essa *non è satura.*

Raffreddando gradatamente una soluzione non satura, arriverà un punto in cui la soluzione diviene satura, e se il raffreddamento progredisce ancora, parte del soluto, non potendo più rimaner disciolta, si libera dalla soluzione e si deposita. Accade però talvolta, nell'assoluta tranquillità del liquido, che si può oltrepassare il punto di saturazione senza che il soluto si separi dalla soluzione; in tali condizioni la soluzione si dice *soprassatura.* Questo fenomeno è analogo a quello della soprafusione (§ 221); e parimenti, nel caso della soprassaturazione, basta un urto, l'introduzione di un pezzettino del sale, affinchè l'eccesso del solido precipiti in fondo al vaso.

224. **Calore di soluzione.** — Si è visto ora che quando si effettua la soluzione di un sale (p. es., sale ammoniaco nell'acqua) senza somministrare calore, la soluzione si raffredda; inversamente, la precipitazione di un sale dà luogo a svolgimento di calore.

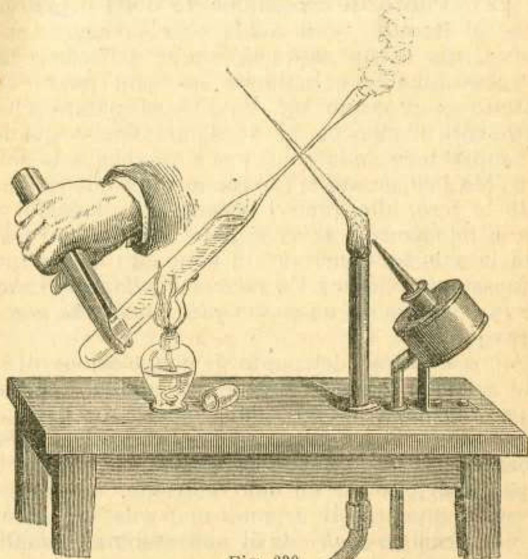


Fig. 230.

L'esperienza si fa facilmente ponendo in un tubetto di vetro terminato a punta una soluzione calda ben concentrata di acetato di piombo, e poi chiudendo la punta alla fiamma (fig. 230). Lasciando raffreddare la soluzione fino alla temperatura ordinaria, essa rimane limpida allo stato di soprassa-

turazione. Ma se si rompe la punta di vetro, il sale improvvisamente precipita, e si svolge tanto calore da rendere il tubo caldissimo al tatto.

Questo calore che si svolge nella separazione del sale, corrisponde al calore assorbito nella soluzione.

225. **Punto di congelamento delle soluzioni; legge di Raoult.** — Si abbia una soluzione poco concentrata di un sale nell'acqua; raffreddandola progressivamente e gettando ad ogni istante un pezzetto di ghiaccio nel liquido, si noterà che i frammenti di ghiaccio si sciolgono anche quando la temperatura della soluzione siasi abbassata sotto zero. Ma ben presto si giunge ad una temperatura sotto lo zero, alla quale i pezzetti di ghiaccio più non si liquefano, e se si seguita a raffreddare ancora la soluzione, arriva un momento in cui tutta la massa si solidifica. *Le soluzioni solidificano dunque in generale ad un punto più basso che non il solvente puro.*

L'abbassamento del punto di congelazione di un dato solvente non dipende dalla natura della sostanza disciolta, ma solo dal rapporto tra i numeri di molecole del solvente e del soluto; ossia il detto abbassamento è lo stesso per tutte le soluzioni che, a parità di peso di un dato solvente, contengono un egual numero di grammi-molecole del soluto. Si dice *grammo-molecola* di una sostanza semplice o composta quella massa il cui peso in grammi è uguale al suo peso molecolare; per es., la molecola-grammo del cloruro di sodio (Na Cl) è di 61,5 gr.

Quanto si è detto è in armonia con la legge di Raoult, secondo la quale « una molecola di un composto qualunque disciolta in 100 molecole d'un dato liquido, ne abbassa di una quantità presso a poco costante il punto di solidificazione ».

226. **Miscugli frigoriferi.** — Si trae profitto del raffreddamento prodotto dal calore di soluzione nei miscugli frigoriferi, per ottenere basse temperature.

Se mescoliamo del ghiaccio finamente pestato con un sale, il ghiaccio deve fondersi: difatti, la soluzione che si ottiene sciogliendo il sale nell'acqua ha il suo punto di congelamento al di sotto di zero gradi; quindi la miscela di sale e ghiaccio a 0° si trova ad una temperatura superiore a quella di solidificazione, e perciò si scioglie. Si determina allora un notevole abbassamento di temperatura che varia con la proporzione di sale e di ghiaccio, poichè il calore è assorbito e per la fusione del ghiaccio, e per la soluzione del sale.

Sono in uso parecchi miscugli frigoriferi: il più semplice di tutti è quello che si ottiene mescolando insieme due parti di neve o di ghiaccio e una parte di sale da cucina. Ponendo un termometro nel miscuglio, presto si vedrà il mercurio scendere sotto 0°, e arrivare sin quasi a — 22°.

Per temperature più basse, fino a — 51°, il miscuglio più comodo è quello di 10 parti di cloruro calcico e 7 di neve.

227. **Vaporizzazione; vapori non saturi e vapori saturi.** — Il calore fornito ai corpi non ha soltanto per effetto di liquefare i solidi, ma ben anche quello di trasformare i liquidi in aeriformi. Il passaggio di un liquido allo stato aeriforme è detto in generale *vaporizzazione*, e si chiamano *vapori* i fluidi aeriformi che risultano da questo cambiamento di stato.

Quando i vapori si formano lentamente alla superficie libera de' liquidi, si dice che v'ha *evaporazione;* mentre è detta *ebollizione* la produzione rapida di vapore in tutti i punti della massa liquida.

La evaporazione avviene a tutte le temperature; la ebollizione invece non succede che ad una determinata temperatura, la quale, per un dato liquido, dipende soltanto dalla pressione.

Sono detti volatili quei liquidi, come l'alcool, l'etere, ecc., che si vaporizzano facilmente; e liquidi fissi, come per esempio gli olii grassi, quelli che evaporano con estrema lentezza. Per alcuni si verifica un limite nella temperatura della evaporizzazione: così l'acido solforico non emette vapori al di sotto di 30°; per altri liquidi invece non v'ha alcun limite.

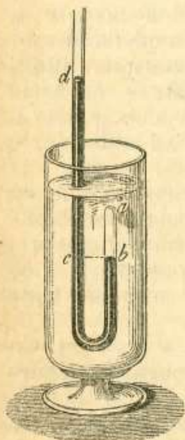


Fig. 231.

Vi sono corpi solidi, come la neve, l'arsenico, la canfora e le materie odorose, che danno dei vapori senza passare per lo stato liquido.

Al pari dei gas, i vapori hanno una forza elastica (tensione) in virtù della quale esercitano sulle pareti dei vasi che li contengono pressioni più o meno considerevoli. Per mostrare la tensione dei vapori, si può riempire di mercurio, a metà, un tubo di vetro ricurvo a guisa di sifone (fig. 231); facendo poi passare un po' d'etere nel ramo corto e chiuso, s'immerge il tubo in un bagno d'acqua tiepida. Allora il mercurio si abbassa nel ramo chiuso per elevarsi in quello aperto, e lo spazio *a b* si riempie di vapor d'etere, la cui forza elastica fa equilibrio alla colonna di mercurio *c d* e alla pressione atmosferica che si esercita in *d*. Se si scalda di più l'acqua del bagno, il livello del mer-

curio nel ramo chiuso scende al disotto del punto *b*, la qual cosa prova che la tensione del vapore aumenta con la temperatura: il contrario succede se si raffredda l'acqua, o si ritira il tubo dal bagno.

In questa esperienza il passaggio del liquido allo stato di vapore si opera con relativa lentezza, e la stessa cosa succede quando un liquido volatile è esposto liberamente all'aria; nell'un caso e nell'altro la pressione atmosferica ritarda la vaporizzazione: ma la cosa va diversamente quando i liquidi si trovano nel vuoto, giacchè in questo caso la loro evaporazione è rapidissima. Si vede così che sul tempo della trasformazione di un liquido in vapore ha influenza la pressione sovra incombente: è poi naturale che, volendo studiare le leggi della vaporizzazione, si debba eliminare in sulle prime questa causa perturbatrice, e osservare la formazione dei vapori nel vuoto.

Supponiamo pertanto che un liquido si trovi in un ambiente limitato e vuoto, come è, per esempio, la camera barometrica. Allora quelle molecole della massa liquida le quali arriveranno alla superficie con sufficiente velocità per isvincolarsi dalla forza di coesione, andranno a vagare nella camera barometrica; ma nello stesso tempo succederà che parecchie di quelle libere movendosi verso la superficie liquida, vi penetreranno e vi saranno trattenute. Se il liquido è in sufficiente quantità, accadrà che, in principio, il numero delle molecole che si svincolano dalla massa liquida supererà il numero delle altre che si riaggregano; così la evaporazione seguiterà, e la massa liquida andrà man mano diminuendo; ma arriverà ben tosto un momento in cui il numero delle prime compenserà quello delle seconde, e allora la massa del liquido più non diminuisce, e lo spazio è *saturo di vapore;* si dice anche

vapor saturo l'aeriforme che lo riempie. Lo stato di saturazione si raggiunge subito, se lo spazio al disopra del liquido era prima vuoto, come abbiamo supposto; la saturazione si raggiunge più lentamente, se invece vi ha un gas.

Un vapore che si trova in uno spazio limitato a contatto del proprio liquido, è un vapore saturo. Questo ha una *densità massima,* alla quale corrisponde una *tensione massima* che non dipende dal volume concessogli, ma unicamente dalla temperatura (§ 227); difatti, se il volume aumenta, si forma nuovo vapore e si ristabilisce subito la densità di prima; se il volume, al contrario, diminuisce, parte del vapore formatosi ritorna liquido, e il numero delle molecole contenute nell'unità di volume rimane ancora costante: pertanto, finchè non muta la temperatura, la densità e la pressione esercitata dal vapore saturo rimangono le stesse.

Dobbiamo quindi distinguere lo stato di vapore non saturo, vapore cioè che non è in presenza del proprio liquido, da quello di vapore saturo presente in un dato volume. La pressione esercitata dal primo dipende, come quella di un gas, dalla temperatura e dal volume che gli è concesso; la pressione esercitata dal secondo dipende invece dalla temperatura soltanto, ed è la massima possibile a quella temperatura.

228. **Proprietà dei vapori non saturi o vapori surriscaldati.** — Si possono mostrare in modo semplice queste proprietà dei vapori, ricorrendo a un apparecchio come quello della figura 232. Su una pozzetta di mercurio profonda sono capovolte due canne, una *E F* che fa da barometro, l'altra *A B* che contiene il vapore di un liquido.

Supponiamo che questo non sia saturo, che cioè sia stata introdotta nella canna una quantità così

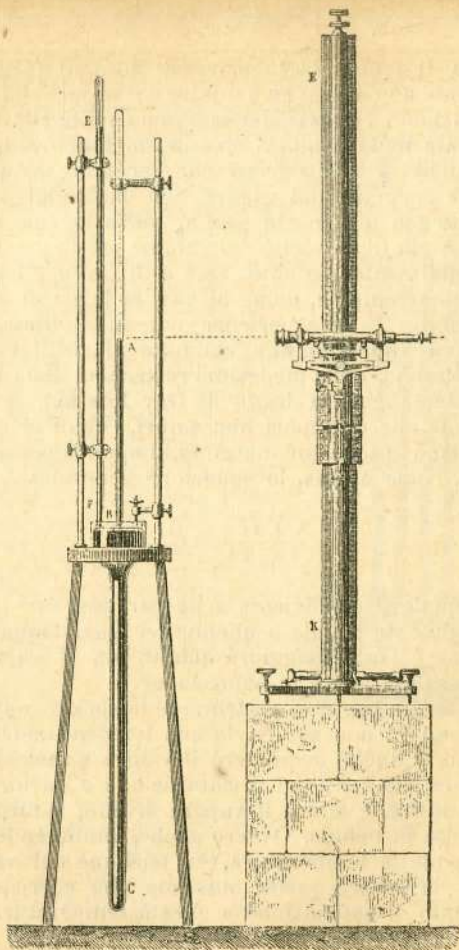


Fig. 232.

piccola di liquido da vaporizzarsi tutta, di guisa che il vapore non si trovi a contatto del proprio liquido, e misuriamo l'altezza del mercurio sul livello della vaschetta nella canna A con un catetometro. In tali condizioni si riconoscerà che facendo variare il volume occupato dal vapore con l'affondare nella pozzetta più o meno la canna, varia la sua pressione, e che il prodotto del volume per la pressione è sensibilmente costante; vale a dire si applica approssimativamente, come ai gas, la legge di Boyle o Mariotte. — Le esperienze poi sulla dilatazione di questi vapori hanno condotto al risultato che essi seguono, colle medesime restrizioni della legge suddetta, anche la legge di Gay-Lussac; onde si conclude che ai vapori non saturi, i quali cioè non esercitano la tensione massima, si applica prossimamente, come ai gas, la equazione generale:

$$\frac{VH}{1+\alpha t}=C$$

nella quale il coefficiente α ha per essi un valore sensibilmente eguale a quello dei gas: l'approssimazione è tanto maggiore quanto più il vapore è lontano dallo stato di saturazione.

Se però si segue a restringere lo spazio concesso a un vapore non saturo, la sua tensione andrà aumentando finchè acquisterà il valore massimo che compete alla tensione di saturazione a quella data temperatura, e allora il vapore diventa saturo, e si produrrà la nebbia. Ovvero anche, diminuendo gradatamente la temperatura, la tensione del vapore finirà per essere quella massima che corrisponde allo stato di saturazione a questa temperatura più bassa; per tale ragione i vapori non saturi sono anche detti *vapori surriscaldati*.

229. **Proprietà dei vapori saturi.** — Ma le condizioni mutano quando nella canna barometrica *A* v'ha del vapore saturo a contatto di un eccesso di liquido. Se si solleva o si approfonda il tubo (fig. 232), il livello del mercurio in tal caso non muta, ossia la pressione del vapore resta la stessa. Nel primo caso, quando cioè si solleva il tubo, il volume aumenta, ma si forma una nuova quantità di vapore, come si è detto innanzi, e la densità e la pressione restano pure invariate. Restando la temperatura la stessa, non si può dunque far variare la pressione di un vapore saturo facendo variare il volume; essa è la massima possibile a quella temperatura e non dipende che da questa: si vede così che i vapori saturi si comportano in modo ben diverso dai gas.

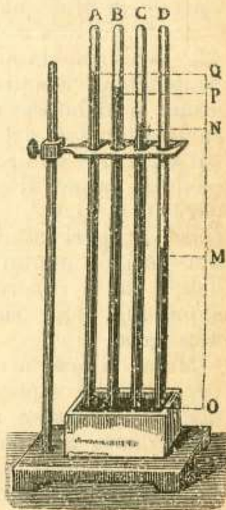


Fig. 233.

Se si circonda l'apparecchio con un largo cilindro di vetro che si possa riempire d'acqua calda, e si ripetono le medesime esperienze a diverse temperature, si trova in ogni caso che il vapore esercita una pressione massima tanto maggiore quanto più elevata è la temperatura. La tensione di un vapore saturo cresce dunque rapidamente e indefinitamente colla temperatura; e poichè essa è indipendente dal volume, si conclude che il peso del vapore necessario a saturare un dato volume aumenta col riscaldamento.

Per mostrare in modo semplice le dette proprietà de' vapori saturi, si riempiono di mercurio quattro canne, come per l'esperienza di Torricelli (fig. 234); la prima *A* si capovolge sul pozzetto e serve da barometro; la seconda *B*, prima di turarla col dito, si finisce di riempire con un po' di acqua, la quale salendo in alto quando si capovolge la canna nel pozzetto, verrà a trovarsi nella camera torricelliana. Allo stesso modo si opera con le canne *C* e *D* che contengono rispettivamente alcool ed etere. In ciascuna si stabilisce rapidamente lo stato di saturazione, essendovi del liquido in eccesso che galleggia sul mercurio dentro la canna; e inclinando più o meno le canne, si osserva che i dislivelli di mercurio *QP*, *QN*...., i quali misurano la tensione de' relativi vapori saturi alla temperatura dell'ambiente, non variano punto; il che sta a provare, come si è detto, che il vapore saturo esercita la stessa tensione qualunque sia il volume, se la temperatura non varia.

Ma se si scalda cautamente la canna nella parte occupata dal vapore e dal suo liquido, si vede subito la pressione aumentare. Sotto questa forma l'esperienza non può farsi così facilmente; ma Regnault, adoperando apparecchi e metodi acconci, ha determinato con grande precisione la *tensione massima del vapor d'acqua alle varie temperature*, come indica la tabella seguente:

TENSIONE MASSIMA DEL VAPORE ACQUEO

IN CENTIMETRI DI MERCURIO ALLA LATITUDINE DI PARIGI (48° 50′)
(Secondo REGNAULT).

NB. Per esprimere queste tensioni in dine sopra un centimetro quadrato, basta moltiplicare i numeri seguenti per 13,596 × 980,96.

Temperatura	Tensione in centimetri di mercurio	Temperatura	Tensione in centimetri di mercurio	Temperatura	Tensione in centimetri di mercurio	Temperatura	Tensione in centimetri di mercurio
—32°	0,0320	11°	0,9792	37°	4,6691	105°	90,641
30	0,0386	12	1,0457	38	4,9302	110	107,537
25	0,0605	13	1,1162	39	5,2039	115	126,941
20	0,0927	14	1,1908	40	5,4906	120	149,128
15	0,1400	15	1,2699	41	5,7910	125	174,388
10	0,2093	16	1,3536	42	6,1055	130	203,028
9	0,2267	17	1,4421	43	6,4346	135	235,373
8	0,2455	18	1,5357	44	6,7790	140	271,763
7	0,2658	19	1,6346	45	7,1391	145	312,555
6	0,2876	20	1,7391	46	7,5158	150	358,123
5	0,3113	21	1,8495	47	7,9093	155	408,856
4	0,3368	22	1,9659	48	8,3204	160	465,162
3	0,3644	23	2,0888	49	8,7499	165	527,454
2	0,3941	24	2,2184	50	9,1982	170	596,166
—1	0,4263	25	2,3550	51	9,6661	175	671,743
0	0,4600	26	2,4988	52	10,1543	180	754,639
+1	0,4940	27	2,6505	55	11,7478	185	845,323
2	0,5302	28	2,8101	60	14,8791	190	944,270
3	0,5687	29	2,9782	65	18,6945	195	1051,963
4	0,6097	30	3,1548	70	23,3093	200	1158,896
5	0,6534	31	3,3406	75	28,8517	205	1295,566
6	0,6998	32	3,5359	80	35,4643	210	1432,480
7	0,7492	33	3,7411	85	43,3041	215	1580,133
8	0,8017	34	3,9565	90	52,5450	220	1739,036
9	0,8574	35	4,1827	95	63,3778	225	1909,704
10	0,9165	36	4,4201	100	76,0000	230	2092,640

230. **Applicazioni; ipsometro.** — Vedremo che un liquido bolle quando la tensione massima del suo vapore eguaglia la pressione che sopporta. Tale dipendenza tra la temperatura di ebollizione dell'acqua e la pressione ch'essa sopporta, dà il modo di misurare la pressione barometrica col mezzo del termometro, e in conseguenza l'altezza delle montagne (§ 125). Infatti, se si osserva che l'acqua bolle, per esempio, a 95° sulla vetta di un monte, mentre alla base essa bolle a 98°, cercando nella tavola qui sotto le tensioni corrispondenti, si trovano dei numeri che rappresentano in centimetri di mercurio le forze elastiche del vapore che si svolge dall'acqua alla vetta e alla base della montagna, e per conseguenza la pressione atmosferica che l'acqua in ebollizione sopporta alle due stazioni. Conoscendo così l'altezza barometrica alla sommità e alla base del monte, non si ha più che ripetere il calcolo che abbiam fatto quando si è parlato del barometro (§ 125). A tal fine bisogna usare termometri assai sensibili, graduati soltanto da 80° a 100° circa, in modo da poter apprezzare

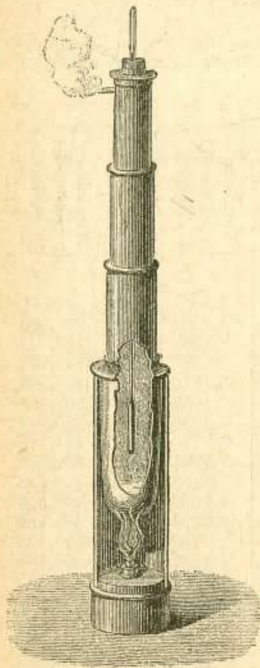


Fig. 234.

con essi il decimo di grado. Così è fatto il *termometro ipsometrico* di Regnault, e l'apparecchio è rappresentato dalla fig. 234. Regnault poi ha costruito all'uopo la seguente tavola che dà la tensione del vapore d'acqua da 85° a 95° di mezzo grado in mezzo grado, e da 95° a 100° di decimo in decimo di grado.

TENSIONI MASSIME DEL VAPORE ACQUEO
IN CENTIMETRI DI MERCURIO
ALLA LATITUDINE DI PARIGI (Secondo REGNAULT).

Temperatura	Tensione	Temperatura	Tensione	Temperatura	Tensione	Temperatura	Tensione
85°,0	43,304	95°,0	63,378	97°,1	68,452	99°,1	73,585
85, 5	44,162	2	63,847	2	68,702	2	73,850
86, 0	45,034	3	64,083	3	68,953	3	74,116
86, 5	45,921	4	64,319	4	69,204	4	74,383
87, 0	46,822	5	64,557	5	69,456	5	74,650
87, 5	47,738	6	64,795	6	69,708	6	74,918
88, 0	48,669	7	65,034	7	69,961	7	75,187
88, 5	49,615	8	65,273	8	70,215	8	75,457
89, 0	50,576	9	65,513	9	70,470	9	75,728
89, 5	51,553	96, 0	65,754	98, 0	70,726	100, 0	76,000
90, 0	52,545	1	65,995	1	70,982	1	76,273
90, 5	53,553	2	66,237	2	71,239	2	76,546
91, 0	54,578	3	66,480	3	71,497	3	76,820
91, 5	55,619	4	66,724	4	71,756	4	77,195
92, 0	56,676	5	66,969	5	72,015	5	77,373
92, 5	57,750	6	67,214	6	72,275	6	77,648
93, 0	58,841	7	67,460	7	72,535	7	77,926
93, 5	59,949	8	67,707	8	72,796	8	78,204
94, 0	61,074	9	67,955	9	73,058	9	78,483
94, 5	62,217	97, 0	68,203	99, 0	73,321	101, 0	78,763

231. **Tensione dei vapori misti ai gas; legge di Dalton.** — Un gas che si trova al di sopra di un liquido ritarda con la sua pressione la vaporizzazione di questo, come si è detto, ma l'esperienza insegna che esso non ha alcuna influenza sulla forza elastica finale del vapore formato. Ogni mescolanza d'un gas e d'un vapore, se non si esercita azione chimica fra di loro, si effettua secondo le leggi seguenti: 1° *quando uno spazio limitato contenente un gas si trova saturato da un vapore, la tensione di questo è la stessa che eserciterebbe nel vuoto alla medesima temperatura;* 2° *la tensione del miscuglio è uguale alla somma delle tensioni che avrebbero il gas e il vapore, se ciascuno d'essi occupasse solo il volume della mescolanza.*

232. **Evaporazione.** — Abbiamo detto che la *evaporazione* è la produzione spontanea di vapore alla superficie libera di un liquido, e avviene a tutte e temperature; e che in uno spazio limitato e vuoto, se v'ha del liquido sufficiente, si raggiunge ben presto la saturazione. All'aria libera invece la produzione di vapore è più lenta a cagione delle collisioni fra le molecole del vapore e quelle del gas sovrastante, e siccome l'aria è quasi sempre mossa e si rinnova, la saturazione non può verificarsi; la produzione di vapore però seguita fino alla scomparsa completa della massa liquida.

È per evaporazione che i corpi bagnati si asciugano all'aria, e l'acqua contenuta in un vaso aperto scompare a poco a poco; è alla evaporazione de' mari, de' laghi, delle grandi distese di terreno umido, che sono dovuti i vapori che si elevano nell'atmosfera, e poi condensandosi formano la nebbia e le nubi.

Le circostanze che influiscono sulla rapidità della evaporazione dell'acqua, sono state studiate da Dal-

ton in un modo molto semplice: all'uopo egli poneva sul piatto di una bilancia un vaso poco profondo ripieno d'acqua, e la perdita di peso che si verificava in un tempo determinato serviva a esprimere la rapidità della evaporazione.

I risultati delle esperienze possono comprendersi nella formola:

$$(1) \qquad M = CS(F-f)\frac{76}{H};$$

nella quale M è la massa d'acqua evaporata nell'unità di tempo che può prendersi a piacere, 1 minuto per esempio: essa dice che la velocità della evaporazione è proporzionale alla superficie evaporante S, alla differenza tra la forza elastica massima F del vapore corrispondente alla temperatura del liquido e la tensione effettiva f del vapore acqueo contenuto nell'aria, ed è inversamente proporzionale alla pressione H. Con gli altri liquidi vale la stessa legge.

La costante C dipende, oltre che dalla natura del liquido, dal luogo dell'esperienza e dalle unità scelte per la misura delle altre grandezze: quanto al luogo è evidente che la rapidità della evaporazione dell'acqua, per esempio, non è la stessa, pari le altre circostanze, su una terrazza scoperta o in fondo a un cortile, giacchè nell'aria agitata l'evaporazione è più rapida che nell'aria calma. Quando lo strato d'aria in contatto con la superficie liquida è frequentemente rinnovato, la saturazione è impedita, e aumentando la differenza $F-f$ della formola (1) la evaporazione aumenta; nell'aria calma può invece accadere che il valore di f si accosti ad essere quello di F negli strati sovrastanti alla massa liquida, e la evaporazione si fa sempre più lenta. Nell'aria secca e leggermente mossa risultò dalle

misure di Dalton che, a 20° e alla pressione normale, si evaporano 9^{gr}, 6 d'acqua sopra 1^{m^2} in un minuto. Questo dato serve a trovare il valore della cost. C, ponendo nella (1) $f = o$, $H = 76$, $F = 17{,}4$ (tav. a pag. 417): si ottiene $C = 0{,}55$; con vento moderato il valore di C aumenta e diviene 0,70; aumenta ancora con un vento più forte.

Riassumendo, la diminuzione della pressione esterna, l'elevazione della temperatura del liquido con la quale aumenta la tensione massima F del suo vapore, la secchezza dell'aria sovrastante, l'agitazione dell'atmosfera, l'accrescimento della superficie libera del liquido, sono altrettante cause che favoriscono una rapida evaporazione: bisogna profittare di tali circostanze ogni volta che occorra accrescere la rapidità dell'evaporazione, come nelle manifatture de' tabacchi, negli essiccatoi, ecc.

233. **Produzione di freddo dovuto alla evaporazione.** — Nella vaporizzazione sono vinte in gran parte le forze molecolari, e quindi si compie un lavoro interno; inoltre la massa si espande in un volume grandemente maggiore vincendo l'esterna pressione, e ciò implica un lavoro esterno. Per tali lavori è necessario il consumo di una equivalente energia, che nel caso nostro è il calore; e però se il calore necessario alla vaporizzazione non sarà ceduto al liquido dai corpi circostanti, il cambiamento di stato si compirà a spese del calore della massa rimanente, che in conseguenza deve raffreddarsi.

Si chiama *calore di vaporizzazione* la quantità di calore necessaria per trasformare un chilogrammo di liquido in vapore, senza variazione della temperatura. Vedremo più innanzi qual'è il calore di vaporizzazione dell'acqua alle diverse temperature; ora diciamo alcuni fatti ovvii, alcune esperienze che

provano che la semplice evaporazione di un liquido è accompagnata da consumo di calore.

Versiamo poche goccie di etere sul palmo d'una mano; proveremo subito una sensazione di freddo per la sottrazione di calore fatta dal liquido che si evapora.

Rivestiamo il bulbo di un termometro con una mussolina bagnata nell'acqua; se si provoca una rapida evaporazione agitando l'aria intorno al termometro, si osserva che il mercurio discende, perchè l'acqua evaporandosi gli sottrae calore: con l'etere il raffreddamento sarebbe più veloce e maggiore.

Il fresco che si prova d'estate agitando un ventaglio, è dovuto all'accelerata evaporazione del sudore onde è madida la cute; fenomeno questo che concorre, anche nei giorni più caldi, a conservare inalterata la temperatura del corpo umano.

Nei paesi caldi, per mantenere fresca l'acqua, se ne riempiono vasi di argilla porosa *(alcarazzas)*, esponendoli in luoghi ventilati; il liquido trasudando attraverso le pareti, si evapora e sottrae in modo continuo calore all'acqua interna, la quale quindi si raffredda.

A mostrare il raffreddamento di un liquido che si evapora a spese unicamente della propria energia, poniamo sotto la campana della macchina pneumatica una grossa goccia di acqua in una capsulina *A* di sughero affumicato, insieme con una vaschetta *V* contenente dell'acido solforico: questo acido assorbe il vapore, e insieme alla diminuzione di pressione serve ad accelerare la evaporazione (fig. 235). Il raffreddamento è tale che la goccia arriva ben presto a congelarsi: l'esperienza è dovuta a Leslie.

Si arriva al medesimo risultato con il *crioforo* di Wollaston: è un tubo di vetro ricurvo, termi-

nato alle sue estremità da due sfere (fig. 236); vi si è introdotta un po' di acqua, e dopo averne espulsa l'aria con la ebollizione, si è chiuso il tubo alla lampada. Facendo passare l'acqua nella sfera *A* e circondando l'altra di un miscuglio frigorifero, avviene una continua distillazione del liquido della sfera *A*, poichè i vapori che ivi si formano con una

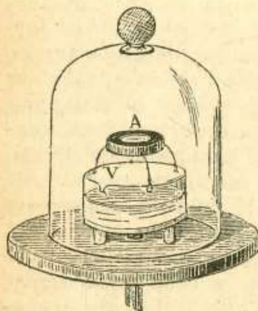


Fig. 235.

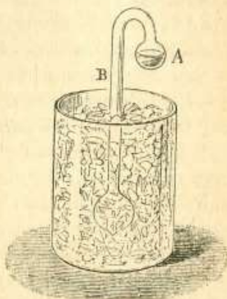


Fig. 236.

maggiore tensione, vanno a condensarsi nella sfera inferiore. L'acqua della sfera *A* prosegue così a evaporare, e raffreddandosi a mano a mano finisce per congelare.

234. **Produzione artificiale del ghiaccio.** — Sono moltissime le applicazioni del freddo dovuto alla evaporazione de' liquidi: per esempio, con il freddo prodotto dall'evaporazione di alcuni liquidi che bollono a temperature assai basse, come l'anidride solforosa, l'anidride carbonica, l'etilene, ecc., e con opportune pressioni, si son potuti liquefare l'ossigeno, il protossido di azoto; e di poi col freddo che si ottiene evaporando questi ultimi, si sono liquefatti anche l'azoto, l'idrogeno.

Diciamo ora come si utilizza il fenomeno in discorso per fabbricare il ghiaccio. Nella macchina Carré esso si ottiene con la evaporazione rapida dell'acqua nel vuoto, come nell'esperienza della

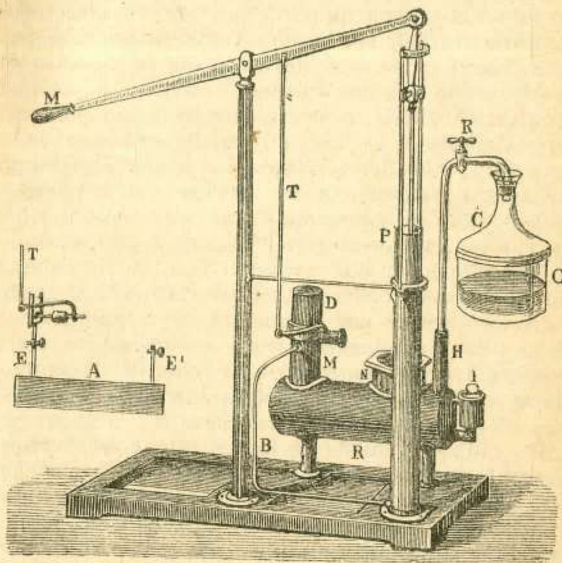


Fig. 237.

fig. 235: in questa macchina (fig. 237) *P* è la pompa che fa il vuoto nel vaso *C* e nel serbatoio *R* rivestito internamente di piombo e contenente acido solforico; *T* è un tirante che mette in moto l'agitatore, rappresentato a parte alla sinistra della figura. L'acqua da congelare è posta nel reci-

piente C: esso può aprirsi togliendone il coperchio, che vi si applica con cera o grasso nel fine di ottenere una buona chiusura.

Molto più importante per l'industria è la produzione del ghiacclo per mezzo del freddo dovuto alla evaporazione di un liquido che bolle a bassa temperatura, il quale per lo più è l'ammoniaca. L'acqua pura che si vuole congelare è posta in cassette di ferro; queste pescano in una vasca di acqua che tiene in soluzione un sale, cosicchè il suo punto di congelamento è di parecchi gradi più basso dello zero. Nel fondo della vasca poi è disposto un lungo serpentino metallico in cui circola e si vaporizza, raffreddando la soluzione, l'ammoniaca liquida: il suo calore di vaporizzazione è molto grande, essendo di 315 calorie per chilogrammo. Così anche l'acqua pura contenuta nelle cassette si raffredda a grado a grado e finisce per ghiacciare: il tempo necessario alla congelazione varia naturalmente colla temperatura del bagno, con la quantità di ammoniaca, con la massa dell'acqua che si deve congelare. Se, per esempio, la temperatura della vasca è di -10^0, blocchi da 13 Kg. si ottengono ordinariamente in 8 ore circa, e in 12 ore quelli da 25 Kg.

Diciamo ora brevemente in che modo sia ottenuta e fatta circolare l'ammoniaca liquida. Una pompa aspirante e premente, detta *compressore,* aspira e comprime l'aeriforme nei serpentini di un *condensatore,* attorno ai quali si fa circolare continuamente acqua fredda, allo scopo di assorbire il calore emesso durante la compressione e la liquefazione dell'aeriforme.

Attraversando una speciale valvola d'espansione, l'ammoniaca liquida passa quindi nei serpentini del refrigerante, dove trovando una bassa pressione dovuta all'aspirazione della pompa, si vaporizza ed

espande, assorbendo una grande quantità di calore dalla vasca. Il ciclo si ripete indefinitamente: il compressore aspira di nuovo l'aeriforme e lo comprime nel condensatore; quivi, ripetendosi l'operazione ad ogni colpo di stantuffo, la pressione aumenta rapidamente, finchè avendo raggiunta la tensione del vapor saturo di ammoniaca che corrisponde alla temperatura dell'acqua circolante, l'aeriforme si liquefa cedendo all'acqua stessa il calore di compressione e quello di vaporizzazione. Se l'apparecchio è bene costrutto e non si verificano perdite nè in esso nè nelle condotte, e se non si avesse per ragione di manutenzione a smontarlo nelle sue parti, la stessa quantità di ammoniaca impiegata da principio potrebbe servire indefinitamente.

235. **Stato igrometrico dell'aria.** — L'atmosfera contiene sempre una certa quantità di vapor d'acqua, a cagione della incessante evaporazione dei mari, dei laghi, dei fiumi, ecc., che ricoprono tanta parte della superficie terrestre. Una porzione del vapore, condensandosi in goccioline o in cristalli, forma le nubi che si risolvono poi in pioggia, neve o grandine; e la neve che copre le vette dei monti ed alimenta i ghiacciai, dà luogo ai corsi dei fiumi, alle cascate; essa rappresenta quindi una enorme quantità di energia, che gli uomini utilizzano in mille modi per le industrie e il loro benessere.

Ma un'altra porzione cospicua del vapor d'acqua non condensata rimane diffusa nell'aria, a cui non toglie la trasparenza; essa si manifesta deponendosi in forma di rugiada o di brina sulle superficie fredde, e influisce sulla pressione barometrica, sul potere di assorbire il calore che ha l'atmosfera, ecc. Un complesso di cause diverse, fra le quali prima

d'ogni altra è la temperatura, operano in modo da render continuamente variabile la quantità di vapor d'acqua d'una parte dell'atmosfera, cosicchè il vapore ora è vicino al punto di saturazione ed ora ne è molto al di sotto. È importante di saper misurare il grado dell'umidità atmosferica.

Si dice *umidità assoluta* in un dato luogo e in un dato istante la quantità di vapore contenuta in un dato volume d'aria, per esempio in un metro cubo; essa è in ogni caso proporzionale alla tensione effettivamente esercitata dal vapore commisto all'aria. Ma con la semplice cognizione dell'umidità assoluta non possiamo formarci un criterio intorno alla maggiore o minore umidità dell'aria, poichè il vapore potrà esser più o meno vicino al *punto di saturazione,* a seconda della temperatura; e noi giudichiamo umido un ambiente, quando si è prossimi alla saturazione. Così è che *lo stato igrometrico* o *umidità relativa* si misura col rapporto fra la quantità di vapore effettivamente contenuta in un certo volume d'aria, poniamo in un metro cubo, e quella richiesta a saturare lo stesso volume. Essendo tali quantità proporzionali alle rispettive tensioni del vapore, ne viene che l'umidità relativa viene espressa dal rapporto fra la tensione effettiva e la tensione massima corrispondente alla temperatura dominante.

La tensione massima è data dalla tavola di Regnault delle forze elastiche del vapor d'acqua alle diverse temperature (§ 228); la tensione effettiva, da cui poi si deduce lo stato igrometrico, si misura con gli *igrometri;* di questi ve n'ha di diverse specie.

236. **Igrometro a condensazione.** — Uno dei più semplici *igrometri a condensazione* è quello del Chistoni. Esso è costituito da una cassetta pri-

smatica *B* di ottone sottilissimo (fig. 238), sostenuta dalla colonnina *G*, con la faccia anteriore *A* argentata e ben speculare, la quale si estende oltre il contorno delle pareti laterali *B*. Entro la cassetta si versa dell'etere, il tubo *C* sbocca nella massa liquida, l'altro tubo *D* finisce superiormente; congiungendo questo a un aspiratore, si fa gorgogliare dell'aria attraverso all'etere; oppure per il cannello *C* si può insufflare l'aria attraverso al liquido con una pera di gomma. Colla rapida vaporizzazione dell'etere provocata in tal modo, si produce un abbassamento di temperatura e un deposito di rugiada sulla parete *A*. La spiegazione è semplice: alla temperatura dell'ambiente il vapore che vi si trova non è in quantità sufficiente a saturarlo; ma raffreddandosi gradatamente la parete *A*, questa raggiunge presto la temperatura cui dovrebbe trovarsi l'ambiente per essere saturo del detto vapore. La parete speculare allora si appanna, e si coglie con precisione il punto in cui comincia a depositarsi la rugiada, per contrasto con le parti periferiche che rimangono splendenti. Si nota allora per mezzo del termometro *T* la temperatura alla quale comincia la condensazione del vapore e si

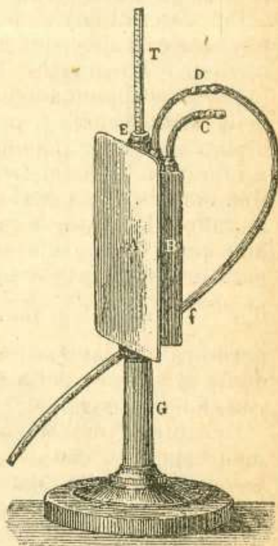


Fig. 238.

legge sulla tavola di Regnault la tensione massima che vi corrisponde. Essa è la tensione effettiva del vapore nell'ambiente: dividendola per la tensione massima del vapore che corrisponde alla temperatura dell'ambiente letta su un secondo termometro si avrà lo stato igrometrico.

Per determinare con esattezza la temperatura t, alla quale si deposita la rugiada, si legge sul termometro T prima la temperatura θ a cui si vede apparire l'appannamento; questa è un po' minore della temperatura t, perchè, in generale, ci accorgiamo dell'appannamento con un certo ritardo, e intanto il termometro seguita a discendere continuando la evaporazione dell'etere. Indi si cessa il raffreddamento, e si legge la temperatura θ' alla quale la rugiada scompare; quest'ultima temperatura sarà invece un po' superiore a t. La media $\frac{\theta + \theta'}{2}$ sarà con buona approssimazione la temperatura di saturazione t cercata, di fronte alla quale si troverà nella tabella ora ricordata la corrispondente tensione f.

Un difetto dell'apparecchio è che l'etere più o meno acquoso che esce dal tubo D, altera lo stato igrometrico nello spazio immediatamente vicino; la vicinanza inoltre dell'osservatore produce una perturbazione della stessa specie. La prima causa di errore si toglie unendo al beccuccio D un tubo di gomma, che conduca il vapore a sfogarsi lontano dall'istrumento.

L'igrometro ora descritto è una modifica di un altro dovuto a Regnault, e basato sullo stesso principio.

237. **Psicrometro.** — Il *psicrometro* consta di due termometri; il bulbo di uno di essi si mantiene umido col mezzo di una garza bagnata che lo riveste, mentre il bulbo dell'altro rimane asciutto ed

è destinato semplicemente a misurare la temperatura dell'aria. L'acqua, evaporando, sottrae calore al termometro bagnato, e l'agitatore a palette mosso da un movimento d'orologeria accelera la evaporazione (fig. 239). Pel freddo che si produce così, il termometro bagnato avrà una temperatura inferiore a quello asciutto; ma mentre esso perde calore per l'evaporazione dell'acqua, ne guadagna anche dall'ambiente; seguiterà dunque a scendere fino a che il guadagno non eguagli la perdita: a questo punto si sarà raggiunto l'equilibrio.

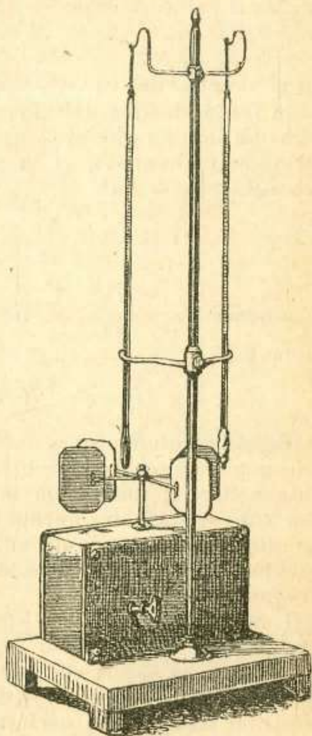


Fig. 239.

Diciamo t' la temperatura indicata dal termometro bagnato quando ha raggiunto l'equilibrio, e t la temperatura segnata dal termometro asciutto. Ritenendo, secondo la legge di Newton, che il guadagno di calore fatto dal termometro bagnato sia proporzionale alla differenza tra la temperatura dell'ambiente e la propria, il calore che esso ri-

ceve dall'ambiente per unità di superficie sarà $C'(t-t')$, indicando con C' una costante. D'altra parte, per la legge di Dalton sull'evaporazione (§ 231), il calore ch'esso perde sarà proporzionale a $C(F'-f)\frac{76}{H}$, ove C è pure una costante, f la forza elastica del vapore contenuto nell'atmosfera, F' la forza elastica del vapor saturo alla temperatura del liquido che si evapora, ossia a quella t' del termometro bagnato, H la pressione barometrica. Eguagliando, si ha:

$$C(F'-f)\frac{76}{H}=C'(t-t');$$

e ponendo $K=\frac{C'}{76\,C}$, se ne deduce la forza elastica f, cioè:

$$f=F'-KH(t-t').$$

Il coefficiente K dovrà determinarsi confrontando una o più volte il psicrometro con un igrometro; vale a dire si determina la f col metodo prima descritto, e si risolve questa equazione rispetto a K. Le ulteriori osservazioni, affinchè siano attendibili, debbono essere fatte nelle stesse circostanze in cui avvenne il confronto.

Il molinello a palette spazza continuamente il vapore che si forma, e impedisce che lo spazio circostante si saturi di umidità. È appena necessario avvertire che il movimento delle alette debba farsi dal termometro asciutto verso il bagnato, e non viceversa. Determinata nel modo ora detto la f, si cerca poi nella solita tavola di Regnault la tensione massima F corrispondente alla temperatura t dell'aria, e il loro quoziente dà la frazione di saturazione, ossia l'umidità relativa.

238. **Igrometro ad assorbimento.** — Molte sostanze come legni, ossa, minugie, capelli, variano di volume quando assorbono l'umidità. Su questo principio è costrutto l'igrometro di Saussure, fatto con un capello lavato diligentemente prima con potassa e poi con acqua, indi asciugato; esso si allunga quando l'umidità aumenta, e si accorcia nel caso contrario. Il capello fissato ad un capo (fig. 240) si avvolge sulla gola di una puleggia *A*, e vien teso debolmente dal pesetto *P* attaccato all'altro capo. Esso comanda un indice che si muove dinanzi ad una graduazione, la quale viene fatta così: si segna *zero* dove l'indice si ferma lasciando per alcuni giorni l'istrumento sotto una campana racchiudente calce viva, sostanza avidissima, come si sa, d'umidità; e si segna 100, dove l'indice si arresta quando l'istrumento viene posto sotto una campana con le pareti interne bagnate, e quindi in un ambiente saturo. L'igrometro indica pertanto la umidità relativa dell'ambiente, nel quale viene esposto; ma le indicazioni sue variano col tem-

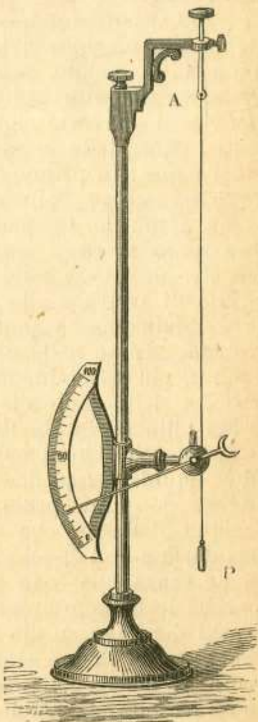


Fig. 240.

po, perchè il capello si altera, e l'istrumento non può perciò raggiungere un buon grado di precisione.

239. **Ebollizione.** — Se si seguita a scaldare un liquido, la tensione del suo vapore aumenta finchè eguaglia o, meglio, supera di pochissimo la pressione sovrastante; allora il liquido entra in *ebollizione*, si converte cioè rapidamente in vapore in tutti i punti della massa. Supponiamo che il liquido sia l'acqua: in principio osserveremo che si liberano numerose bollicine di aria; poi, elevandosi sempre più la temperatura, la evaporazione alla superficie libera si accelera; indi un fremito particolare dovuto a bolle di vapore che si rompono prima di arrivare alla superficie, precede la regolare ebollizione; e quando, finalmente, questa comincia, grosse bolle di vapore si formano in tutti i punti, più specialmente a contatto delle pareti del vaso, e si liberano alla superficie.

Ma affinchè la ebollizione accada regolarmente, è necessario che l'acqua (e lo stesso dicasi degli altri liquidi) tenga disciolta o aria o altro gas; se invece con una preliminare ebollizione si purga l'acqua dell'aria che vi si trova disciolta, si può scaldarla poi al di sopra della temperatura di ebollizione senza che essa bolla. Questo fatto ci spiega perchè le bolle prendono di preferenza origine sulle pareti del vaso, o alla superficie di un solido sommerso, sulle quali è sempre aderente un velo d'aria. Affinchè poi le bolle che così si formano possano arrivare alla superficie e liberarsi, bisogna che il vapore abbia una forza espansiva di pochissimo superiore alla pressione sovrastante.

240. **1ª Legge dell'ebollizione:** — *Per un medesimo liquido, la temperatura di ebollizione, sotto una pressione costante, è invariabile: tale tempera-*

tura è quella a cui il vapore possiede una tensione massima eguale (o di pochissimo superiore) alla pressione che il liquido sopporta. Così, per esempio, l'acqua sotto la pressione normale di 76 cm. di mercurio bolle a 100°; e difatti a questa temperatura la tensione massima del suo vapore è precisamente eguale alla pressione di 76 cm. di mercurio. Se invece l'acqua si trova in un'atmosfera rarefatta, per esempio sino a 9,2 cm. di mercurio, bolle a 50°; e la tavola delle forze elastiche del vapor d'acqua mostra che a 50° la tensione massima del vapore è appunto di 9,2 cm. di mercurio. Questa legge stabilita da Dalton si verifica sotto ogni pressione: la pressione sovrastante regola dunque la temperatura alla quale un liquido bolle. Regnault si è valso appunto di questa legge per determinare la tensione massima del vapor d'acqua alle diverse temperature.

In generale, si dice *punto di ebollizione* di un liquido la temperatura alla quale esso bolle, quando è soggetto alla pressione atmosferica normale di 76 cm. di mercurio.

Per dimostrare che la temperatura di ebollizione dipende dalla pressione, si può ricorrere, fra le altre, alle seguenti esperienze. Una storta *A* (fig. 241) contenente dell'acqua e munita di un termometro è messa in comunicazione con un pallone per mezzo di un tubo circondato da un refrigerante *B*. Nel pallone penetra la vaschetta di un barometro a sifone *C*, destinato a misurare la rarefazione che vi si fa col mezzo di una macchina pneumatica. Si constata così che l'acqua bolle a temperature tanto più basse quanto minore è la pressione. Questo apparecchio è simile a quello che usò Regnault per la misura della forza elastica del vapor d'acqua a diverse temperature.

In lezione si può mostrare l'influenza della pressione sulla temperatura di ebollizione dell'acqua

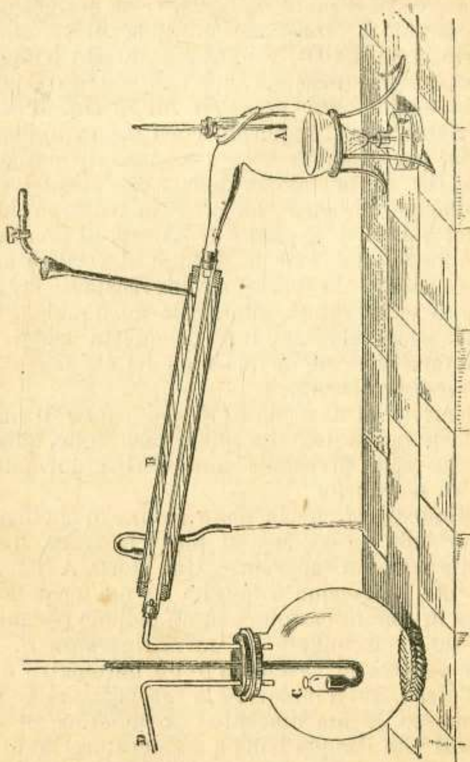


Fig. 241.

con una semplice esperienza dovuta a Franklin: si fa bollire dell'acqua in un pallone a lungo collo finchè l'aria sia tutta espulsa dal vapore, e vi re-

stino soltanto acqua e vapore. Chiuso allora il recipiente con un tappo, e capovolgendone il collo, come indica la fig. 242, sull'acqua di un bicchiere, la tensione del vapore sovrastante impedisce che si sollevino delle bolle dal liquido; ma se si raffredda la parte superiore del pallone con una spugna inzuppata di acqua fredda, accade una parziale condensazione di detto vapore; si produce allora una subitanea diminuzione di pressione, e l'acqua entra rapidamente in ebollizione.

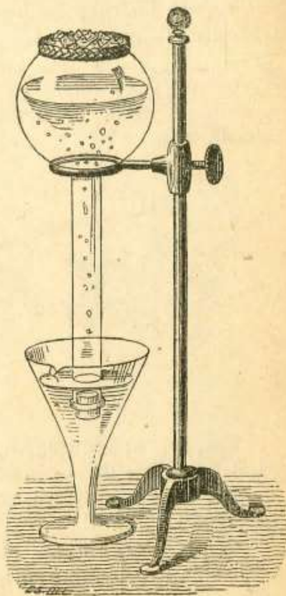


Fig. 242.

La stessa cosa si può mostrare col mezzo del *bollitore di Franklin*. Esso è un piccolo apparecchio di vetro formato da una sfera *a* e da un tubo *b* riuniti da un cannello di piccolo diametro (fig 243): prima di chiuderlo alla lampada, vi s'introduce un poco d'alcool che si fa bollire finchè i suoi vapori abbiano scacciato tutta l'aria; poi si chiude l'estremità del tubo *b* fondendola alla lampada. Non essendovi più aria, il liquido non sopporta nel tubo altra pressione che la tensione del suo vapore, la quale è piccola alla temperatura ordinaria. Prendendo allora la sfera *a* nelle mani, e disponendo l'apparecchio come mo-

stra la figura, il calore così fornito dà al vapore una tensione tale che respinge il liquido nel tubo *b* e vi determina una viva ebollizione.

Sulle alte montagne la pressione atmosferica è considerevolmente minore che al livello del mare, e perciò l'acqua bolle sotto 100°: per esempio sul Monte Bianco, a 4775 metri d'altezza sul mare, l'acqua bolle a 84°; ivi le uova, per esempio, non possono rassodarsi completamente nell'acqua bollente, e male si disciolgono in questa il thè, il caffè, ecc.

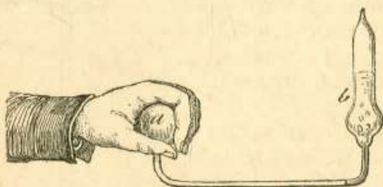


Fig. 243.

Ma se, al contrario, la pressione aumenta, la temperatura di ebollizione si eleva: sotto la pressione di 2 atmosfere, p. es., l'acqua non bolle che a 120°,6.

Come conseguenza di questo fatto sarà possibile d'innalzare la temperatura dell'acqua al di sopra di 100°, e in generale la temperatura di tutti i liquidi al di sopra del loro punto di ebollizione, scaldandoli in vasi ermeticamente chiusi, resistenti alla tensione del vapore. In tal caso la pressione esercitata dal vapore sulla superficie del liquido impedirà che questo bolla, e lo si potrà scaldare sino alla temperatura critica senza che cambi di stato, o piuttosto fino a che la tensione del vapore non faccia scoppiare il vaso.

La *pentola di Papin* (fig. 244) ne è un'applicazione: essa è una caldaia *A* ermeticamente chiusa con un coperchio, il quale è mantenuto contro l'apertura da una forte vite *F*; una valvola trattenuta dalla leva *L* limita, a piacere dell'operatore, la forza elastica che il vapore non deve punto oltrepassare, e previene lo scoppio del vaso.

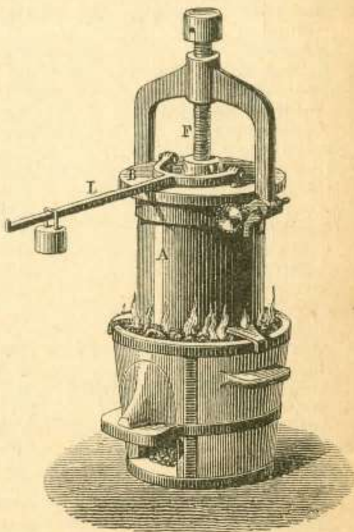


Fig. 244.

Difatti il vapore che si forma aumenta di tensione con la temperatura, e l'acqua che riempie soltanto in parte la pentola può essere portata a temperature ben superiori a 100°, e servire alla cottura di sostanze che non lo sarebbero a questa temperatura.

Se si solleva un poco la leva *L*, la valvola s'innalza, l'acqua si mette tumultuosamente a bollire, e il vapore che esce con violenza si condensa nell'atmosfera più fredda, e anche perchè nella sua espansione esso si raffredda.

Per tale ragione si può impunemente tener la mano nel getto del vapore ch'erompe da una caldaia a qualche distanza dall'orifizio.

PUNTI DI EBOLLIZIONE

Sostanze	Tem. cent.	Sperimentatori
Idrogeno	— 253°	Dewar
Azoto	— 194.4	Olszewski
Aria	— 191	»
Ossido di carbonio.	— 190	»
Ossigeno	— 183	Dewar
Ossido d'azoto	— 153.6	Olszewski
Metano	— 150	Wroblewski
Etilene	— 102.5	»
Protossido d'azoto	— 88	Pictet
Anidride carbonica	— 78.2	»
Ammoniaca	— 38.5	Regnault
Acido cloridrico	— 35	Vincent e Chappuis
Cloro	— 33.6	Regnault
Cianogeno	— 20.7	Faraday
Anidride solforosa	— 10.08	Regnault
Etere cloridrico	+ 11	
Etere etilico	34.9	Kopp
Solfuro di carbonio . . .	46.2	Regnault
Acetone	56.53	Thorpe
Bromo	59.3	»
Cloroformio	61.2	»
Alcool assoluto	78.4	Kopp
Benzolo	80.36	Pisati
Acido nitrico concentrato	86	
Acqua	100	
Acido acetico	117.3	Kopp
Essenza di trementina . .	159.15	Regnault
Fosforo	290	Mitscherlich
Olio di lino	316	
Acido solforico	325	
Mercurio	357.5	Regnault
Zolfo	447	Hittorf
Potassio	667	Perman
Sodio	742	»
Zinco	930	Violle

241. 2ª **Legge dell'ebollizione:** — *Qualunque sia la sorgente di calore, la temperatura d'un liquido rimane la stessa durante l'ebollizione*: qui, come nel caso della fusione, il calore fornito dalla sorgente, poi che il liquido è stato scaldato sino al

punto d'ebollizione, è unicamente impiegato a trasformarlo in vapore. E difatti occorre del calore non solo per vincere la coesione tra le molecole del liquido, ma anche per comunicare ad esse la energia necessaria a superare la esterna pressione, a fare cioè un lavoro esterno. Per l'acqua il detto calore è considerevole, richiedendosi per ogni chilogr., alla temperatura di 100°, circa 536 calorie. Il vapore a 100° non differisce sostanzialmente dall'acqua a 100° che per l'aggiunta di tale calore detto *calore di vaporizzazione*, ovvero *calore di elasticità del vapore.*

In generale, si dice *calore di vaporizzazione* di un liquido il calore che bisogna comunicare alla massa di 1 kg., portata già alla temperatura di ebollizione, per trasformarla completamente in vapore saturo alla stessa temperatura: esso dipende dalla temperatura, e vedremo più innanzi una formula di Regnault per determinarlo, nel caso dell'acqua, a ogni temperatura. Il calore di vaporizzazione era detto in passato *calor latente,* perchè servendo esso non a riscaldare il vapore al di sopra del punto di ebollizione, ma a fare un lavoro, non agisce sul termometro.

Per assicurarsi che il vapore che si solleva dal liquido bollente ha la stessa temperatura di questo, basterà porre il termometro ora dentro il liquido ed ora nel vapore che sta immediatamente al di sopra della superficie: si troverà che esso indica lo stesso numero di gradi. Ma perchè ciò si verifichi, è necessario che il liquido sia puro, se no la temperatura del vapore è diversa da quella del liquido.

242. **Influenza delle sostanze disciolte sulla temperatura di ebollizione.** — E in verità ogni sostanza disciolta in un liquido, se essa non è vo-

latile, ritarda l'ebollizione tanto più, quanto maggiormente concentrata è la soluzione.

L'acqua che sotto la pressione normale bolle a 100° se è pura, bolle invece alle seguenti temperature se è satura di differenti sali:

L'acqua	satura	di	sal marino	bolle a	109°
»	»	»	nitrato di potassio	»	116°
»	»	»	carbonato di potassio	»	135°
»	»	»	cloruro di calcio	»	179°

Le soluzioni acide presentano lo stesso fenomeno: però le sostanze soltanto sospese, come le materie terrose, non elevano la temperatura d'ebollizione.

L'esperienza poi dimostra che, sebbene la temperatura di ebollizione dell'acqua sia superiore a 100° per effetto delle sostanze in essa disciolte, la temperatura del vapore che se ne svolge è tuttavia sempre uguale a 100°, come se l'acqua fosse pura, supposto sempre che la pressione sia quella normale. Per ciò, se si vuol sapere la temperatura di un liquido che tenga in soluzione delle sostanze, bisogna immergervi il termometro; se invece si espone il termometro soltanto al vapore (fig. 5), la temperatura indicata è sempre quella di ebollizione del solvente puro.

243. **Calore di vaporizzazione dell'acqua.** — Regnault ha trovato di poter esprimere il calore necessario a trasformare 1 kg. d'acqua preso a 0° in vapor saturo alla temperatura t, con la seguente formula:

$$q = 606{,}5 + 0{,}305\ t\ ,$$

nella quale q è la detta quantità di calore espressa in calorie. Ora, dicendo γ le *calorie di vaporizzazione* dell'acqua alla detta temperatura, e c il ca-

lore specifico dell'acqua che si può ritenere eguale all'unità, si ha evidentemente:

$$\gamma = q - ct$$

ossia, sostituendo per q il suo valore,

$$\gamma = 606{,}5 - 0{,}695\, t\,.$$

Se si pone $t = 100$, si ha $\gamma = 537$; ossia, per trasformare 1 kg. d'acqua in vapore saturo alla temperatura di 100°, occorrono 537 calorie. Viceversa, ogni qual volta 1 chilogr. di vapor d'acqua si condensa e torna liquido nelle stesse condizioni, si rende libero il medesimo numero di calorie.

È utile osservare che il calore di vaporizzazione diminuisce con la temperatura.

244. **Distillazione.** — Quando si ha un liquido che tiene in soluzione delle sostanze fisse, come per esempio dei sali, e si vuole isolare il liquido allo stato di purezza, si ricorre alla distillazione. Il vaso, detto *lambicco,* si compone, come mostra la fig 245, d'una caldaia C nella quale è posto il liquido che si vuol purificare, per esempio acqua; la caldaia comunica per mezzo del cappello K e del tubo T con un serpentino di metallo S circondato da acqua fredda; questa è mantenuta tale mercè una corrente che arriva nel fondo, sposta l'acqua calda della parte superiore, che se ne va per la cannella P; l'estremità O del serpentino poi termina nel vaso in cui si vuol raccogliere l'acqua distillata. Il vapore che si solleva dall'acqua in ebollizione, ritornando liquido nel serpentino, cede le calorie di vaporizzazione all'acqua del vaso V che si scalda, e perciò è necessario

rinnovarla come si è detto. Si sospende l'operazione quando sono distillati tre quarti circa del liquido impiegato.

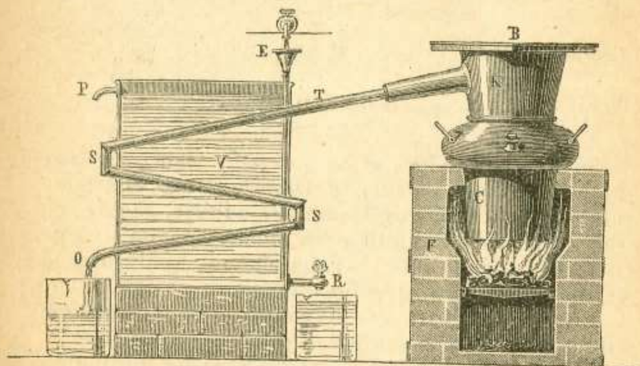


Fig. 245.

245. **Lambicco di Salleron.** — Se si immergesse l'alcoolometro nel vino, non si avrebbe alcuna utile indicazione, imperocchè la densità del liquido, oltre che dalla proporzione d'alcool e d'acqua, dipende anche dalle altre sostanze disciolte. Bisogna dunque, per saggiare la ricchezza alcoolica dei vini, distillarli; poi ricondurre il prodotto della distillazione al volume primitivo coll'aggiunta d'acqua pura; e nel miscuglio d'acqua e d'alcool così ottenuto, immergere l'alcoolometro (§ 113).

Il lambicco rappresentato dalla fig. 246 è molto comodo per questa determinazione. Si versano nel palloncino *P* tre volumi di vino misurati colla provetta *R*, si stabilisce la comunicazione col serpentino *S* circondato d'acqua fredda, e si porta il vino

all'ebollizione col calore di una semplice lampada a spirito: si sospende l'operazione quando si è distillata una metà circa del liquido, perchè allora tutto l'alcool, o quasi, si è vaporizzato, e si finisce di riempire la provetta sino al segno 3 con acqua distillata, come si è detto; l'alcoolometro, alla temperatura di 15°, darà la proporzione centesimale in volume dell'alcool contenuto nel vino saggiato (§ 113).

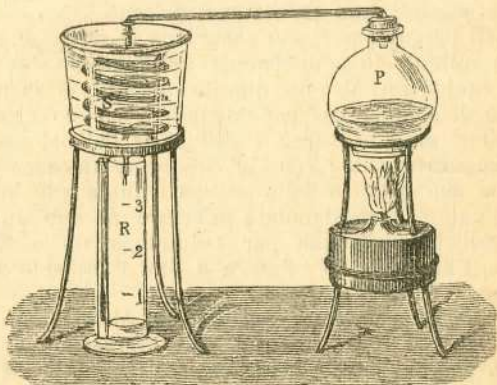


Fig. 246.

246. **Calefazione; fenomeno di Leidenfrost.** — Non vogliamo passare sotto silenzio il *fenomeno di Leidenfrost,* chiamato anche *calefazione;* ecco in che cosa esso consiste. Se si scalda fino al rosso un cucchiaio, una capsula di rame, d'argento, di platino, ecc., e vi si fa cadere delle goccie d'acqua con una pipetta, queste non entrano in ebollizione, ma si riuniscono in un globo sferico un po' appiattito, che alla mente richiama l'idea delle goccie di

mercurio a contatto di pareti che esso non bagna. La goccia difatti non tocca le pareti del vaso rovente; essa è animata da un movimento giratorio rapido sul fondo della capsula, e si vaporizza assai lentamente. Boutigny, al quale si devono numerose ricerche su questo soggetto, ha chiamato il fenomeno *stato sferoidale* del liquido. Ma se si raffredda il piattello o la capsula, arriva un momento in cui lo stato sferoidale finisce, il liquido tocca le pareti e succede una ebollizione violenta.

Tutti i liquidi possono assumere lo stato sferoidale; soltanto la temperatura del piattello dev'essere tanto più elevata quanto più alto è il loro punto di ebollizione: per l'acqua il vaso dev'essere scaldato almeno verso i 300°; per l'alcool basta la temperatura di circa 140°. Boutigny ha osservato che la temperatura della massa liquida allo stato sferoidale è costantemente inferiore al suo punto di ebollizione: l'acqua per esempio, resta a 95°,5 circa; l'alcool a 75°; l'etere a 34°; l'anidride solforosa a — 10°,5.

247. **Liquefazione dei gas.** — Molti sono gli studii teorici e sperimentali sull'interessante argomento; ma si deve all'Andrews la scoperta di un fatto di capitale importanza che ha gettato viva luce sul fenomeno: vale a dire, esiste per ogni sostanza una *temperatura critica,* al disopra della quale essa si conserva gasosa, qualunque sia la pressione a cui venga assoggettata; mentre al disotto di detta temperatura, la sostanza stessa assume lo stato aeriforme o liquido, secondo le condizioni di pressione e di temperatura. Alla temperatura critica poi v'ha, per ogni sostanza, una speciale pressione *(pressione critica),* per ogni minima variazione della quale si determina uno stato piuttosto che l'altro. Nella tavola seguente sono riportati, per alcuni corpi, i

punti critici che sono determinati dalla temperatura e dalla pressione critica: si vede che i corpi che ordinariamente sono allo stato liquido, hanno la loro temperatura critica molto alta; mentre, al contrario, l'ossigeno, l'azoto, l'idrogeno l'hanno tanto bassa, che sino a pochi anni fa si disperava di poterla raggiungere.

Punti critici di alcune sostanze.

Sostanze	Temperatura centigrada	Pressione in atmosfere	Sperimentatori
Idrogeno H_2	— 234°,5	20	Olszewski
Azoto N_2	— 146	35	»
Ossido di carbonio CO	— 141,1	35,9	Wroblewski
Ossigeno O_2	— 118	50	»
Metano CH_4	— 99,5	50	Dewar
Etilene C_2H_4	+ 10,1	51	»
Anidride carbonica CO_2	30,9	72	Andrews
Acetilene C_2H_2	37	68	Devar
Ammoniaca H_3N	130	115	»
Cloro Cl_2	146	93,5	Knietsch
Anidride solforosa SO_2	155,4	78,9	Saiotschewsky
Alcool etilico C_2H_6O	235,5	67,1	Hannay
Solfuro di carbonio CS_2	273,5	72,87	Battelli
Benzina C_6H_6	291,7	60,5	Ramsay
Acqua H_2O	364,3	194,6	Battelli

Prima che Andrews avesse posto in chiaro il concetto della temperatura critica, molti fisici, e segnatamente il Natterer, cercarono di liquefare i principali gas conosciuti sottoponendoli a fortissime pressioni. Soltanto sei di essi resistettero ai tentativi di condensazione, e cioè: l'idrogeno, l'ossigeno, l'azoto, l'ossido di carbonio, l'idrogeno protocarbonato e il biossido di azoto; essi avevano resistito persino ad una pressione di 3000 atmosfere, e perciò furon detti gas permanenti. Dopo però la conoscenza della temperatura critica, anche questi gas furono potuti liquefare, raffreddandoli convenientemente e comprimendoli.

Alcuni di essi, i più coercibili, possono ridursi allo stato liquido mediante semplice raffreddamento. Così, per es., basta far circolare l'anidride solforosa in un tubo ad *U* munito inferiormente di un'ampolla circondata dal ghiaccio (fig. 247), affinchè nel fondo della medesima si raccolga, alla pressione ordinaria, la sostanza liquida.

Per alcuni altri gas, i quali — come l'anidride solforosa — alla temperatura ordinaria si trovano molto al disotto della temperatura critica, si può sperimentare in modo analogo; oppure basta la semplice compressione per farli passare allo stato liquido, e occorrerà una pressione tanto minore, quanto più bassa sia la temperatura ambiente.

Se si pone, ad esempio, acqua di cloro in una parte di un forte tubo di vetro ricurvo (fig. 248) e la si riscalda poi cautamente, il cloro, svolgendosi, si raccoglierà in goccioline dall'altra parte del tubo per la compressione che esso esercita su sè medesimo. Collo stesso procedimento, dovuto a Faraday, si possono ottenere liquidi il cianogeno, l'idrogeno solforato, l'ammoniaca ed altri gas.

Se l'aeriforme è meno coercibile, bisognerà allora applicare contemporaneamente i due principii precedenti, bisognerà cioè raffreddarlo e comprimerlo. Così l'anidride carbonica e il protossido di azoto possono liquefarsi coll'apparecchio rappresentato dalla fig. 249. Esso consta di una bomba *R* di ferro a pareti robuste, la quale inferiormente comunica, per mezzo di una valvola che si apre verso l'interno, con una tromba e con il tubo *A* che mette a un gazometro; il tutto è circondato da un miscuglio frigorifero. Mettendo in azione la pompa, l'anidride carbonica aspirata per *A* viene compressa nel recipiente *R* fino alla sua liquefazione; e affinchè la tromba non si riscaldi troppo nel lavoro di

compressione, si fa circolare in N acqua fredda. Si rovescia di poi l'apparecchio, e manovrando la vite V si può ottenere un getto liquido, che raffreddandosi



Fig. 247.

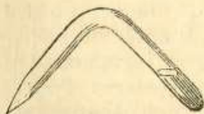


Fig. 248.

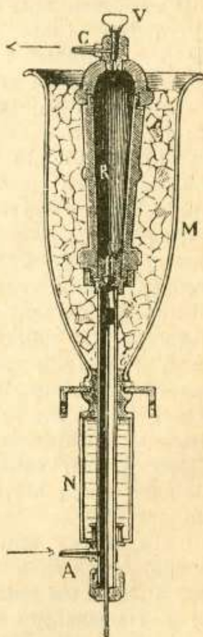


Fig. 249.

per la rapida evaporazione, si solidifica in fiocchi simili a quelli della neve; volendo, si può raccoglierli in una borsa di flanella. Con lo stesso procedimento si può rendere solido il protossido di azoto.

L'anidride carbonica solida sciolta nell'etere produce un abbassamento di temperatura di — 90°, e costituisce un miscuglio frigorifero tale, che versato sopra uno strato di mercurio, lo congela subito. Il protossido di azoto liquido mantiene la temperatura di — 105°.

Ma per liquefare i cosidetti gas permanenti, si sono dovute ideare macchine speciali per ciascun gas. I primi ad iniziare tali ricerche furono Cailletet che riuscì a vederne la nebbia, e Pictet che operando molto più in grande riuscì ad averne anche dei getti liquidi.

Non possiamo intrattenerci nella descrizione di tali apparecchi; ricorderemo però che, per ottenere l'ossigeno liquido, Pictet lo comprimeva fino a 470 atmosfere, dopo averlo raffreddato a — 130° mediante l'anidride carbonica liquida che evaporava. La liquefazione dell'anidride carbonica era a sua volta operata dalla vaporizzazione dell'anidride solforosa. Mediante un opportuno congegno di pompe, la macchina poteva mantenersi per parecchio tempo in azione. Aprendo la chiavetta della forte storta di ferro in cui veniva compresso l'ossigeno, ne eruppe un getto bianco soffuso da un'aureola turchina.

Con lo stesso trattamento, ma servendosi del protossido d'azoto anzichè dell'anidride carbonica, Pictet ottenne un getto grigio di idrogeno a — 140° e ad una pressione di 650 atmosfere: l'idrogeno, compiendo un lavoro esterno nell'espandersi bruscamente, si raffreddava ulteriormente e la sua temperatura scendeva al di sotto di quella critica.

Nel 1883 Wroblewski e Olzewski poterono ottenere liquidi, in modo stabile, parecchi gas permanenti. L'apparecchio che serviva a comprimere il gas e a permetterne la dilatazione brusca, non

differiva da quello di Cailletet, che per la sua forma esteriore. Servendosi come refrigerante dell'etilene liquido, essi poterono raccogliere discrete quantità di azoto e di ossigeno. Riuscirono anche ad ottenere l'aria liquida, e dimostrarono che essa presenta i fenomeni più complessi dei miscugli; per esempio, il suo punto di ebollizione va salendo perchè l'azoto è più volatile dell'ossigeno, e quindi l'aria liquida va col tempo facendosi più ossigenata.

Ma, in questi ultimi anni, il prof. Linde ha ideato un apparecchio che per la sua semplicità ha sostituito vantaggiosamente tutti gli altri usati in precedenza: ecco il principio ingegnoso su cui si fonda. Quando un gas si espande senza compiere lavoro esterno, si raffredda alcun poco se altri corpi non gli cedono calore durante l'espansione. Joule e Sir W. Thomson, ai quali si devono studi ed esperimenti molto accurati su tale argomento, trovarono che il raffreddamento è proporzionale alla differenza di pressione che si verifica durante l'espansione, e inversamente proporzionale al quadrato della temperatura assoluta. Si può propriamente ritenere che, in media, l'aria si raffreddi di $0^{\circ},28$ quando, espandendosi, la sua pressione diminuisce di un'atmosfera.

Tale diminuzione di temperatura è così piccola, che non sarebbe possibile ottenere effetti rilevanti senza ricorrere a pressioni molto grandi, che gli apparecchi male potrebbero sopportare.

Ma servendosi del detto abbassamento di temperatura per raffreddare ulteriormente l'aria compressa che è poi fatta espandere, gli effetti si sommano, e finalmente si perviene a ridurre l'aria alla condizione di vapore saturo e alla sua liquefazione.

La fig. 250 rappresenta schematicamente l'apparecchio del Linde. Con la tromba premente *P* si mantiene una circolazione continua di aria per entro a un sistema chiuso di tubi, prendendola dal tubo *A* dove si trova già compressa, e spingendola, dopo averla compressa sino a 200 e più atmosfere a seconda degli apparecchi, pel tubo *B* nel refrigerante *R*, dove viene raffreddata da una corrente d'acqua. Dal refrigerante *R* l'aria viene poi spinta in un tubo di rame largo 4 cm. e molto lungo, circondato in tutta la lunghezza da un altro tubo più largo, formanti insieme un serpentino a doppia parete; nella figura, per semplicità, questi due tubi uno circondante l'altro, sono rappresentati diritti con *I* ed *E*. La massa gasosa da *I*, per la valvola regolatrice *V* erompe nel tubo esterno *E*, donde per *A* ritorna alla tromba, come indicano le freccie. Questa controcorrente in *E* raffredda l'aria compressa che viene da *R*, cosicchè in una nuova espansione il raffreddamento progredisce, e seguitando la circolazione in tal modo, l'aria scende ben

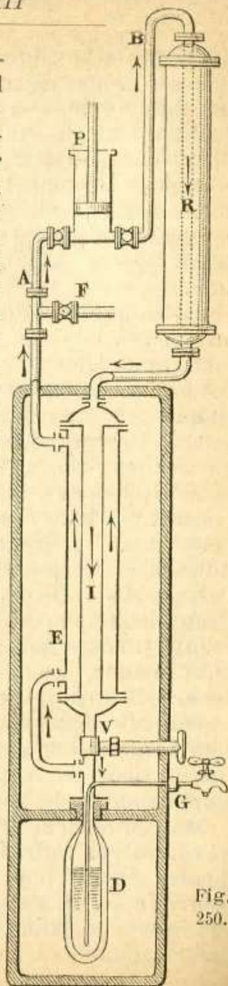


Fig. 250.

presto sotto la sua temperatura critica; allora si raccoglie il liquido nella bottiglia del Dewar *D*, la quale è a doppia parete, e nell'intercapedine si è fatto il vuoto per proteggere il liquido dal calore esterno. Si sopperisce all'aria che si condensa aggiungendone altra dall'esterno, col mezzo di una seconda pompa *F* che effettua una prima compressione sino a 20 atmosfere circa.

Con tale processo, disponendo di un motore da 7 cavalli per il funzionamento delle pompe *P* ed *F*, e di una sufficiente corrente d'acqua per il refrigerante *R*, si possono raccogliere da 4 a 5 litri d'aria liquida all'ora. Dal cannello *G*, munito di chiavetta e pescante fino al fondo della bottiglia *D*, si può come da una bottiglia d'acqua di seltz travasare il liquido in un secondo recipiente del Dewar: a proteggere questi recipienti dal calore esterno, non solo si fa il vuoto nell'intercapedine, come si è detto, ma si rende speculare, inargentandola, la superficie interna. Tali vasi devono rimanere aperti, e l'aria vi si mantiene liquida per delle ore sotto la pressione dell'atmosfera, alla temperatura di circa — 201° che è il suo punto di ebollizione, e ciò in grazia del raffreddamento provocato dalla rapida evaporazione. Il liquido, per lo più torbido a causa di fiocchi di anidride carbonica che vi sono sospesi, si può filtrare, e diventa allora limpido, di color ceruleo. E poichè l'azoto vaporizza più facilmente, il liquido diventa mano a mano più ricco d'ossigeno, come si è già notato.

Gli esperimenti con l'aria liquida destano la più grande meraviglia: per un liquido così freddo tutti gli altri corpi, il ghiaccio compreso, sono relativamente molto caldi; e però, quando l'aria liquida viene a contatto con essi, succede presso a poco quello che avviene dell'acqua che cade su un ferro

rovente: si vaporizza rapidamente, se non accade il fenomeno dello stato sferoidale.

Bello è, per esempio, vedere come l'aria liquida versata in un foro praticato in un pezzo di ghiaccio, vaporizza rapidamente; se vi si tuffa un corpo avente un punto in ignizione, esso si accende e brucia in mezzo al ghiaccio con viva luce. Una massa di mercurio su cui si versa un po' d'aria liquida, solidifica subitamente.

Il caucciù immerso per poco nell'aria liquida, diventa rigido e fragile come il vetro; una campanella di piombo così raffreddata, squilla come una di argento.

L'alcool e l'etere, i due liquidi più refrattari alla solidificazione, raffreddati con l'aria liquida congelano anch'essi ben presto. La polvere di carbone mista all'aria liquida, forma una massa facilmente infiammabile, e potrebbe costituire un nuovo esplosivo.

Le applicazioni industriali dell'aria liquida sino ad oggi non sono molte, ma si può prevedere che aumenteranno in un prossimo avvenire.

Non vogliamo passar sotto silenzio che ultimamente al Dewar è riuscito non solo di liquefare l'idrogeno e l'elio, ma di ridurli anche nelle condizioni di liquidi stabili. Il punto di ebollizione dell'idrogeno è di — 250°, molto vicino cioè allo zero delle temperature assolute: nessuno può prevedere quali saranno le proprietà della materia a tal punto, quando sta per spegnersi ogni velocità molecolare. Questa, passi la frase, è la morte della materia.

248. **Descrizione elementare d'una motrice a vapore.** — Finiamo questo argomento dell'energia termica, dicendo poche parole sul modo di funzionare di una macchina a vapore; al qual fine

è necessario di descriverne prima brevemente le parti essenziali, ossia il generatore del vapore o caldaia, e l'apparecchio motore.

Una caldaia a vapore è un recipiente chiuso, in cui si genera vapore a una pressione superiore a quella atmosferica. Si fa di lamiere di ferro unite fra loro mediante chiodi ribaditi a caldo. La forma più comune è quella cilindrica con fondi piani o calotte sferiche.

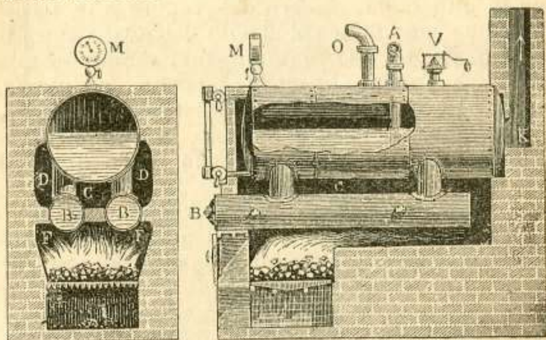


Fig. 251.

La caldaia può essere *orizzontale* o *verticale*, con bollitori o riscaldatori; a *focolare interno*, od *esterno; tubolare*, ecc. La fig. 251 rappresenta una caldaia a focolare esterno con due bollitori *B, B*. Essa è *fissa* ed è rinchiusa entro una camera in muratura, nella quale sono praticati i condotti che i prodotti della combustione dovranno percorrere, prima di arrivare al camino. Sarebbe *semifissa* se fosse scoperta, semplicemente appoggiata su sedie in ghisa, o fissatavi mediante viti; *mobile*, se montata su carro con ruote. *A* è il tubo di alimenta-

zione pel quale l'acqua è spinta in caldaia da una pompa; O è il tubo di presa del vapore che lo guida al cassetto della macchina; M il manometro che indica la pressione in caldaia, V la valvola di sicurezza caricata da un peso per mezzo di una leva, in modo che, quando la pressione supera un certo limite, essa si apra e dia sfogo all'eccesso di vapore. Sul davanti della caldaia si vede un robusto tubo di vetro detto *indicatore di livello*, comunicante in alto colla camera del vapore e in basso coll'acqua; esso indica il livello dell'acqua in caldaia, il quale dev'essere mantenuto sempre a tale altezza che l'acqua bagni la *superficie riscaldata*, ossia le pareti della caldaia lambite dalle fiamme.

Nella figura si vede il focolaio, la griglia, il cinerario e la porta attraverso alla quale si fa il caricamento del combustibile.

Le fiamme lambiscono prima il fondo dei bollitori B, B; il fumo torna indietro pei condotti laterali e si ripiega per C verso il camino K, cosicchè ne venga utilizzato bene il calore.

Le caldaie sono a *bassa pressione* se questa non supera le due atmosfere; a *media pressione* se essa è compresa fra due e cinque atmosfere; ad *alta pressione* se è superiore a cinque atmosfere. La tendenza moderna è di impiegare caldaie ad alta pressione, perchè aumenta il rendimento utile.

Descriviamo ora una delle più semplici macchine a vapore, che come le altre macchine termiche, servono a trasformare l'energia termica in energia meccanica. Sono *senza* o *con espansione*, secondo che il vapore agisce sullo stantuffo a piena pressione durante tutta la sua corsa, o solo per una parte di essa.

Una motrice è rappresentata di fronte dalla figura 252 e di fianco dalla fig. 253. Si vede in F il

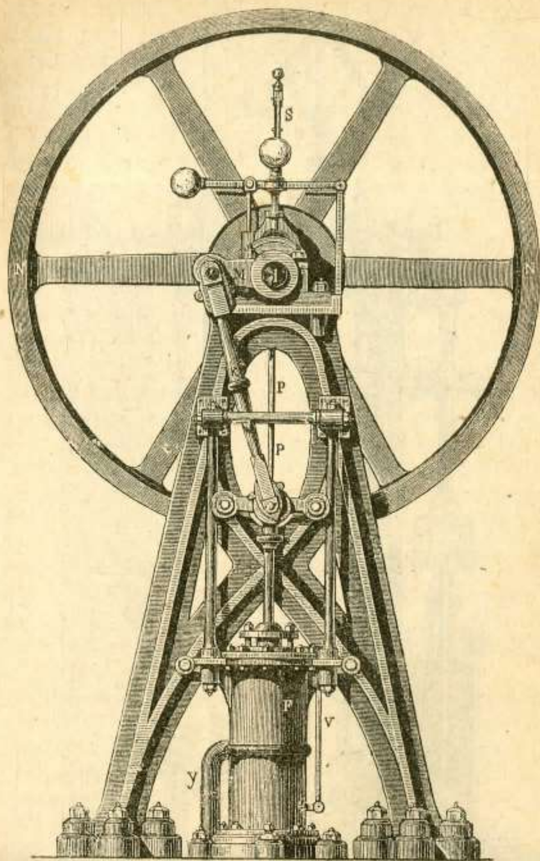


Fig. 252.

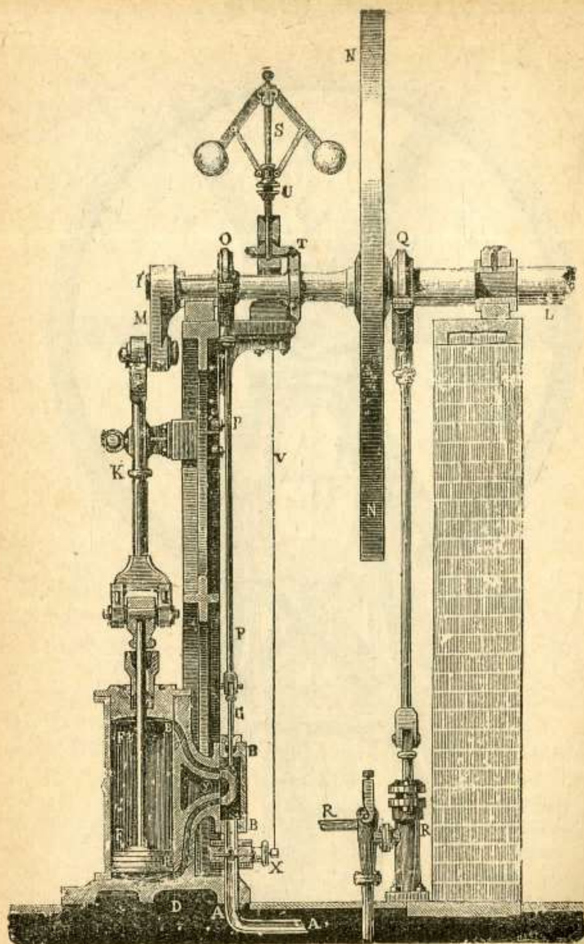


Fig. 253.

cilindro verticale nel quale si muove alternativamente su e giù lo stantuffo *H* con la sua asta, che passa attraverso ad un foro del coperchio munito della *scatola a stoppa,* entro la quale scorre a tenuta d'aria. L'asta si articola con il braccio *K* e la manovella *M,* e così si trasforma il moto rettilineo di va e vieni dello stantuffo in moto circolare dell'albero principale *L* della macchina, col quale fa corpo il volano *N* fisso coassialmente con esso. Dall'albero poi il moto viene trasmesso per mezzo di cinghie e pulegge alle macchine, nelle quali si vuole utilizzare l'energia.

Quando la manovella *M* è in basso od in alto, il braccio della potenza è nullo: queste due posizioni si dicono i *punti morti* della macchina; essi vengono superati a spese della forza viva da cui è animato il volano, il quale oltre a ciò compie, in grazia del suo grande momento d'inerzia, l'ufficio di regolatore della velocità. Sull'albero motore sono inoltre gli organi destinati al servizio della macchina; il disco *Q* fissato perpendicolarmente all'albero motore *IL* in modo che il centro sia fuori dell'asse della rotazione, epperò chiamato *eccentrico,* è abbracciato a sfregamento da un anello che comanda un tirante articolato coll'asta della tromba *R,* la quale serve ad alimentare la caldaia.

Altri simili eccentrici con anelli e tiranti articolati fanno agire le trombe del condensatore quando v'è: così pure l'eccentrico *O* serve a muovere, mediante l'asta *P,* il *cassetto* nella camera di distribuzione *B B,* ove il tubo conduttore *A* immette il vapore della caldaia, affinchè questo agisca or sull'una ed ora sull'altra faccia dello stantuffo, com'è indicato dalle fig. 254, 255. La prima, che rappresenta la fase ascendente, mostra come il vapore

spinga lo stantuffo dalla parte di sotto, mentre quella di sopra comunica con l'atmosfera o col condensatore pel foro *Y*; il contrario succede nell'altra figura, che rappresenta invece la fase discendente.

Il moto dell'albero per mezzo di ingranaggi conici si trasmette poi al parallelogrammo articolato *S*, detto *regolatore a forza centrifuga* (fig. 253): per la rotazione, le due sfere si allontanano tanto più

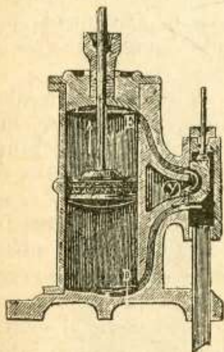


Fig. 254.

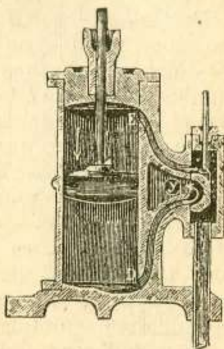


Fig. 255.

quanto maggiore è la velocità angolare dell'albero, ed allontanandosi alzano un colletto *U* che, per mezzo di un filo *V*, comanda una valvola *X* destinata a regolare la luce libera per cui il vapore va al cilindro.

Il lavoro utile di una macchina si misura d'ordinario con freni dinamometrici, ed anche facendo disegnare alla macchina diagrammi, le cui ascisse sono proporzionali alle corse dello stantuffo e le ordinate alle corrispondenti pressioni del vapore, in modo che l'area da essi racchiusa rappresenti

il lavoro della macchina in un'andata e in un ritorno dello stantuffo.

Il modo di agire di una macchina a vapore è pertanto il seguente: 1° col mezzo di una pompa una certa quantità di acqua alla temperatura T_0 di un corpo freddo detto *condensatore* è injettata nella caldaia e vi è trasformata in vapore saturo alla temperatura T_1; 2° il vapore passa nel cilindro, spinge lo stantuffo per un certo tratto della corsa, durante il quale si dice che la macchina funziona a *pieno vapore*; poi, interrotta la comunicazione con la caldaia, il resto della corsa si compie per l'espandersi del vapore introdotto, donde il nome di *macchina a espansione.* Ora il vapore, nello spingere lo stantuffo, effettua un lavoro e si raffredda; cosicchè quando sfuggirà dal cilindro per andare a condensarsi nel condensatore, avrà una quantità di calore minore di quella che aveva nell'entrarvi. Si può pertanto dire che nella macchina a vapore si consuma il calore fornito dal combustibile che arde nel fornello; questo trasforma l'acqua a T_0 in vapore saturo a T_1, e una parte si consuma nel lavoro di spingere lo stantuffo, mentre un'altra viene ad essere ceduta al condensatore quando il vapore vi si condensa. Si ha dunque lavoro perchè il calore passa da un corpo più caldo (caldaia) ad uno più freddo (condensatore), come nelle ruote idrauliche si ha lavoro perchè l'acqua scende da un livello più alto ad uno più basso. Ma in quest'ultimo caso si consuma l'energia che l'acqua acquista nella caduta; mentre nella macchina a vapore si consuma invece effettivamente del calore.

Nelle buone motrici a vapore si consuma in media un chilogramma di carbone per cavallo e per ora; cosicchè il *rendimento pratico,* tenuto anche conto delle inevitabili dispersioni del calore,

non supera l'11 per 100. Ma si dimostra che non è possibile, in un lavoro continuato, trasformare tutto il calore disponibile in lavoro: in una macchina, per esempio, che avesse la caldaia a 152° a cui corrisponde una tensione del vapore di 5 atmosfere, e il condensatore a 40°, il *rendimento massimo teorico* sarebbe del 26 per 100. Si vede che bisognerà paragonare il rendimento pratico 11 % non già al 100 per 100, ma a questo rendimento massimo teoricamente calcolato.

Ci duole di non poter entrare in altri particolari su l'importante argomento.

CAPITOLO IX.

Ottica.

249. **Calore e luce.** — Parlando della trasmissione del calore, abbiamo accennato come essa avvenga anche nel vuoto di materia ponderabile, e come si spieghi ammettendo che l'energia da cui sono animati gli atomi e le molecole dei corpi, dotati di moti rapidissimi di vibrazione, venga comunicata all'etere cosmico: questo poi la trasmette per onde, che si propagano con la velocità grandissima di circa 300.000.000 metri al minuto secondo, comunicandola ad altri corpi o agli organi dei sensi. Qualunque corpo irraggia continuamente dell'energia, perchè in natura non v'ha corpo assolutamente freddo, vale a dire privo di ogni energia molecolare cinetica; ma finchè la temperatura non arriva a un certo limite, 525° circa, i moti periodici delle molecole sono relativamente troppo lenti e le onde troppo lunghe per affettare l'organo della vista; sono queste le *onde di calore oscuro,* che si possono constatare col mezzo del termometro o di altri strumenti, e che impressionano i nervi del tatto. A 525° circa un corpo da oscuro comincia a diventar rosso, si rende cioè visibile senza il concorso di altri corpi; allora il numero delle vibrazioni arriva a 400 bilioni (400×10^{12}) al secondo

e le onde eteree hanno la lunghezza di 76 milionesimi di centimetro. Tali onde destano dunque in noi la sensazione del rosso cupo. A mano a mano poi che la temperatura aumenta fino a 1200° circa, il colore del corpo passa gradatamente dal rosso cupo al bianco; il corpo a questa temperatura diventa incandescente, ed emette le luci di tutti i colori, dal rosso al violetto. A quest'ultimo colore corrispondono 800 bilioni (800×10^{12}) vibrazioni al secondo, e le rispettive onde hanno la lunghezza di circa 38 milionesimi di centimetro. Onde più corte di queste si propagano pure nell'etere e corrispondono a periodi di vibrazioni più brevi di quelli detti, ma esse non possono impressionare più gli organi dei sensi; producono invece altri effetti a seconda dei corpi che incontrano, e ai quali cedono la loro energia. Sono queste le *onde ultraviolette*, il cui effetto consiste particolarmente nel promuovere la combinazione e la decomposizione di certi corpi. Per esempio, una miscela di idrogeno e di cloro esposta all'azione di tali onde così brevi, si combina violentemente con una esplosione, e dà luogo al gas acido cloridrico; sono esse principalmente che decompongono i sali aloidi d'argento delle lastre fotografiche, e producono tanti e tanti altri effetti che diremo in appresso.

Accade qualche cosa di analogo con i suoni: come le vibrazioni di un corpo sonoro destano una sensazione diversa sul tatto e sull'orecchio, così è diversa la sensazione che produce il sole sulla mano e nell'occhio: il tepore e la luce che proviamo sono entrambi dovuti all'energia delle onde eteree, la quale dunque determina una percezione o l'altra a seconda dell'organo che la riceve. Così pure, a quel modo che l'orecchio non percepisce come suoni vibrazioni di corpi elastici le quali

siano minori di 16 o maggiori di 40000 al minuto secondo, l'occhio non percepisce come luce vibrazioni eteree le quali siano minori di 400 bilioni o maggiori di 800 bilioni al minuto secondo: il suono però richiede per propagarsi un mezzo ponderabile, e la luce no: il suono è dovuto ad onde longitudinali, la luce invece ad onde trasversali.

Queste verità scaturiscono dall'esame attento di certi fenomeni, ma il loro studio non può formare argomento di questo piccolo trattato, e quindi dobbiamo contentarci di accennarle senz'altro.

Riassumendo, diremo che una sorgente di calore e di luce produce, con le sue rapide vibrazioni molecolari ed atomiche, nell'etere che la circonda delle perturbazioni che si propagano in tutti i sensi con grandissima velocità, sotto forma di onde: queste sono sferiche quando il mezzo abbia uniforme densità ed elasticità in ogni direzione, come il suono si propaga pure per onde sferiche nell'aria, se questa ha uniforme densità. Se si considera una sola direzione della propagazione delle onde eteree, la diremo *raggio calorifico*, o *luminoso*, o *attinico* a seconda dell'effetto che si prende di mira.

250. **Sorgenti luminose; corpi trasparenti e opachi; diatermani e atermani.** — Sono luminosi o *sorgenti di luce* quei corpi che emettono luce propria, come p. es. il sole, le stelle, le fiamme, ecc., e quindi riescono visibili per sè medesimi, e ci mettono in grado di vedere gli altri corpi che essi illuminano con la loro luce.

A 1200° circa tutti i corpi irradiano una luce bianca: un filo di platino arroventato dalla corrente elettrica; un pezzo di calce o di magnesia reso incandescente con un getto di idrogeno o di gas illuminante che brucia completamente nell'ossigeno

(luce Drummond); il carbone fatto rovente dalla combustione o dalla corrente elettrica (lampade elettriche a incandescenza e ad arco); insomma ogni corpo portato ad alta temperatura costituisce una sorgente luminosa. Notiamo che le fiamme comuni dell'olio, del petrolio, del gas d'illuminazione, delle candele, devono la loro luminosità a particelle minutissime di carbonio che esse tengono in sospensione, le quali diventano incandescenti per l'alta temperatura.

I corpi poi si distinguono in *trasparenti* (aria, acqua, ecc.) ed *opachi* (pietre, metalli, ecc.), a seconda che lasciano o non lasciano passare la luce, Ove si consideri la trasmissione del calore oscuro, si chiamano *diatermani* quelli che lo lasciano passare, come il salgemma; e *atermani* quelli che al contrario l'assorbono, come una soluzione di allume nell'acqua.

I corpi trasparenti per la luce sono poi detti *diafani*, come il vetro, l'acqua, l'aria, ecc., se attraverso ad essi si possono distinguere nettamente i contorni degli oggetti; *pellucidi* o *translucidi* nel caso contrario, come il vetro smerigliato, la carta unta, ecc. Ma sulla opacità e sulla trasparenza influisce, oltre la sostanza del corpo, anche lo spessore attraversato dalla luce. Così le foglie sottilissime, nelle quali possono ridursi l'oro e altri metalli, sono trasparenti; mentre il vetro e l'acqua sotto un forte spessore, possono grandemente scapitare nella loro trasparenza e divenire anche opachi.

251. **Assorbimento, diffusione, riflessione e rifrazione della luce.** — Per facilitare l'esposizione, diciamo sin d'ora poche parole de' fenomeni a cui dà luogo la luce, quando essa nella sua propagazione incontra dei corpi.

In una stanza tenuta perfettamente al buio fac-

ciamo entrare — attraverso un piccolo foro praticato in un'imposta — un fascio di luce solare, di cui potremo seguire la traccia grazie all'illuminazione del pulviscolo atmosferico. Se sulla via di tale fascio interponiamo un cartone annerito col nero fumo, vediamo il fascio luminoso terminare bruscamente sulla superficie del cartone, mentre gli oggetti della stanza rimangono nell'oscurità e sono quasi del tutto invisibili. Ne concludiamo che il nero fumo *assorbe*, estinguendola, quasi tutta la luce che riceve. Ma se invece riceviamo il fascio luminoso su un foglio di carta bianca, tutti gli oggetti intorno si illuminano, perchè i punti della carta che ricevono la luce, la rinviano in ogni direzione. Diciamo perciò che la carta bianca *diffonde la luce,* e tale proprietà è posseduta in maggiore o minor grado da tutti i corpi che non sono neri e hanno la superficie scabra. Fra i corpi che diffondono la luce ve ne sono di quelli che la diffondono non solo dalla faccia rivolta alla sorgente luminosa, ma anche dalla faccia opposta, come, per esempio, il vetro smerigliato, l'alabastro, la porcellana, ecc., ossia quelli che abbiamo detto *pellucidi* o *translucidi.*

Quando poi il fascio cade su di una superficie speculare, lucida cioè e ben tersa, vediamo che esso torna indietro, ossia si *riflette,* ma non irregolarmente, bensì in un'unica direzione determinata dalla nota legge: *l'angolo formato dal raggio incidente con la normale alla superficie riflettente nel punto d'incidenza (angolo d'incidenza), è eguale all'angolo formato con la stessa normale dal raggio riflesso (angolo di riflessione), e i due angoli sono in uno stesso piano.* Siccome però le superficie speculari ottenute artificialmente con la pulitura non sono mai perfette, così accade che la rifles-

sione negli specchi è accompagnata da diffusione; la luce diffusa, in ogni caso, è tanto più debole quanto più tersa e levigata è la superficie riflettente.

Allorchè infine il raggio arriva alla superficie di un corpo trasparente, come, per esempio l'acqua, il vetro, ecc., allora esso in parte è riflesso, e in parte penetra nel corpo rifrangendosi, cambiando cioè di direzione, e forma il *raggio rifratto.*

In seguito si discorrerà ampiamente di tutti questi fenomeni: *riflessione, rifrazione, assorbimento;* per ora ci basti sapere che della luce che arriva alla superficie di un corpo, una parte viene riflessa o diffusa a seconda che la superficie stessa sia più o meno speculare; una parte penetra nel corpo e si propaga attraverso di esso; una parte finalmente viene assorbita, cioè le molecole del corpo se l'appropriano, e l'energia così assorbita dà luogo ad effetti diversi (riscaldamento, azioni chimiche, ecc.). Indicando con Q la totalità della luce incidente, con R, T e A rispettivamente la parte riflessa o diffusa, quella trasmessa e quella assorbita, si ha evidentemente:

$$Q = R + T + A$$

e dividendo per Q entrambi i membri

$$1 = \frac{R}{Q} + \frac{T}{Q} + \frac{A}{Q} = r + t + a$$

essendo r, t, a i coefficienti di riflessione, di trasmissione, di assorbimento.

I valori di tali coefficienti dipendono da molte circostanze: oltre che dal grado di levigatezza o scabrosità della superficie su cui la luce cade, come si è notato, dipendono anche dalla specie dei raggi,

dalla natura e dallo stato fisico del corpo, dallo spessore di questo, ecc. Nel caso della luce bianca e dell'acqua, *a* è piccolo, *t* è grande, si dice perciò che l'acqua è trasparente; *r* cresce con l'angolo d'incidenza: può invece accadere che *t* sia estremamente piccolo o anche nullo, in tal caso il corpo è opaco alla luce. Certi corpi poi, come vedremo, si comportano diversamente per le diverse luci.

252. **Propagazione rettilinea della luce.** — In un mezzo omogeneo e isotropo, costituito cioè egual-

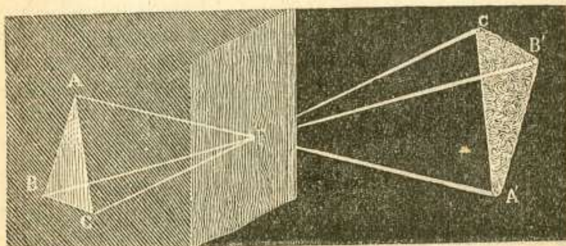


Fig. 256.

mente in tutte le direzioni, la luce, come il calore, si propaga in linea retta. Quanto alla luce, è un fatto di osservazione così comune che non bisognano per provarlo speciali sperimenti; se la luce del sole penetra in una stanza oscura per un piccolo foro, noi vediamo la sua traccia rettilinea in grazia del pulviscolo atmosferico, come si è detto.

Se in una parete di una camera buia si pratica un forellino, compariranno dipinti sulla parete opposta o su altro schermaglio le imagini capovolte degli oggetti esterni (fig. 256). Questa è una conseguenza ed una conferma sperimentale della propagazione

rettilinea della luce: difatti ciascun punto degli oggetti esterni, come A, emette o diffonde de' raggi in tutte le direzioni, e pel foro circolare F ne penetra un cono che va a dipingere sulla parete opposta in A' una piccola ellisse; il punto B produrrà lo stesso effetto in B', ecc., e così a furia di piccole ellissi sovrapposte si formerà l'immagine capovolta $A' B' C'$ dell'oggetto esterno $A B C$. L'imagine avrà i contorni tanto più nitidi, quanto meglio le ellissi si sovrapporranno, e perciò quanto più piccole esse risultano; onde per la nitidezza delle imagini bisogna che il foro F sia piccolo e lo schermo non sia troppo lontano. Allargando il foro o allontanando lo schermo, la sezione de' coni luminosi risulta troppo grande, le ellissi si sovrappongono soltanto in parte, e l'imagine presenta contorni sfumati. Si intende che la forma del foro non ha alcuna influenza: con un foro quadrato, triangolare, ecc., l'imagine risulterebbe egualmente simile all'oggetto per la sovrapposizione di tanti quadratini o piccoli triangoli.

253. **Ombra e penombra.** — La teoria delle ombre è basata sulla propagazione rettilinea della luce. Se la sorgente luminosa è tanto piccola da poterla considerare come un punto, essa illuminerà un corpo opaco sopra una regione nettamente distinta dal resto, che rimarrà nella piena oscurità; e il confine fra le due regioni della *luce piena* e dell'*ombra propria* verrà tracciato da una retta, che passando costantemente pel punto luminoso, girerà tangenzialmente alla superficie del corpo illuminato. Nel caso di una sfera (fig. 257), la linea limite fra la luce piena e l'ombra sarebbe evidentemente una circonferenza. Nel cono generato dalla rotazione della retta in discorso, al di là del corpo opaco, non arriverà il benchè menomo raggio; esso è la

regione dell'*ombra pura,* e tagliandolo con uno schermo apparirà su questo l'*ombra portata;* al di fuori la luce sarà piena.

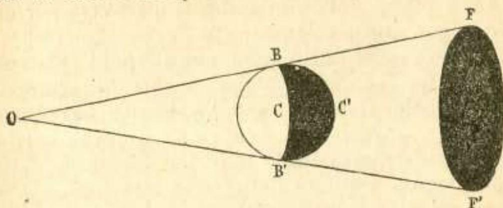


Fig. 257.

Ma se il corpo opaco fosse invece rischiarato da una sorgente di luce estesa, come è il caso più frequente, si distinguerà allora attorno all'ombra portata una porzione di spazio ove la luce non

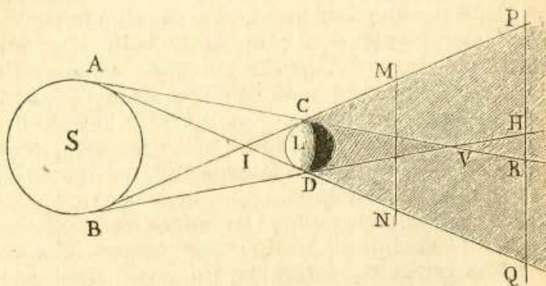


Fig. 258.

arriva che in parte, e nella quale l'ombra va sparendo per sfumature insensibili nella piena luce: questa è la regione della *penombra.*

Nella fig. 258 si vede l'ombra portata dal corpo opaco *C D*, la quale è piena entro la porzione *C V D*

del cono delle tangenti esterne, ed è penombra in tutto il resto del cono delle tangenti interne *B P*, *A Q*. Anche sulla superficie del corpo opaco, si passa dalla luce piena all'ombra pura, attraverso a una zona di penombra.

254. **Velocità della luce negli spazi interplanetari.** — La luce si propaga con grandissima velocità, cosicchè il tempo che impiega a percorrere lo spazio compreso fra due punti sulla superficie terrestre è estremamente piccolo. Ma, nonostante la grandissima velocità della luce, non sarà piccolo il tempo ch'essa metterà a venire sino a noi dalle stelle, poichè queste sono a enormi distanze. Roemer, astronomo danese, potè determinare il tempo che la luce impiega a venire dal sole (anno 1675); e poichè la distanza del sole dalla terra è conosciuta, se ne deduce la velocità della luce negli spazi celesti. Egli si basò su una serie di osservazioni delle occultazioni del primo satellite di Giove, quello cioè più vicino al pianeta. L'orbita di questo satellite *e* si trova all'incirca sul piano equatoriale di Giove *J*, e penetra nel cono d'ombra del pianeta ad ogni sua rivoluzione. Sia *T T' T''* l'orbita descritta dalla Terra intorno al Sole (fig. 259); essa è un'ellisse di cui il Sole occupa uno de' fuochi *S*; tuttavia, in grazia della sua piccola eccentricità, riterremo tale orbita una circonferenza. Rappresenti *J J' J''* l'orbita di Giove; essa fa con il piano dell'orbita terrestre (ecclittica) un angolo che non è molto grande, e quindi, per semplificare ancora il problema, supporremo che giaccia nel piano stesso dell'ecclittica. Quando la Terra è in *T* e Giove in *J* sulla retta *T S* che congiunge i centri della Terra e del Sole, si dice che il pianeta è *in congiunzione* con il Sole, poichè noi lo vediamo dalla stessa parte del cielo dove si trova il Sole. Se invece la Terra

è in T' e Giove in J' in modo che la retta $S\,T'\,J$ passi pure come prima pe' centri de' tre corpi celesti, Giove è visto dalla Terra nella parte del cielo

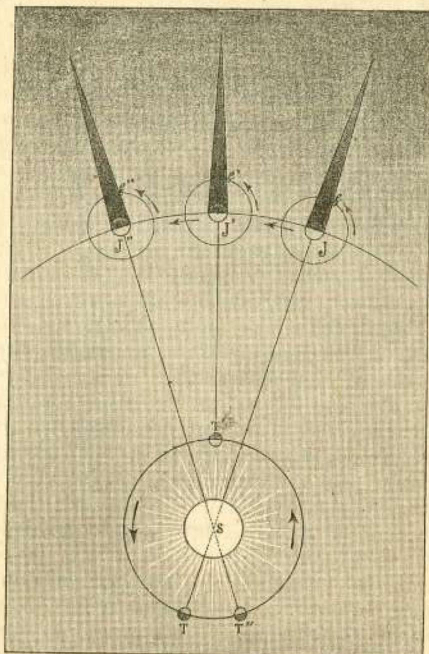


Fig. 259.

opposta a quella in cui si trova il Sole, e si dice perciò che esso è in *opposizione.* Riflettiamo ora che, movendosi la Terra da una congiunzione ad una opposizione, da T in T', essa si trova nella parte

a destra della propria orbita, e il satellite si rende invisibile a noi tutte le volte che si immerge nel cono d'ombra di Giove; al contrario, quando la Terra si trova sull'altra metà dell'orbita, movendosi da una opposizione ad una congiunzione, da T' a T'', noi potremo vedere tutte le successive emersioni del satellite dal cono d'ombra. La rivoluzione del satellite ha un periodo costante, e ciò nullameno furono trovati diversi gli intervalli fra due successive immersioni o fra due successive emersioni. Ciò è dovuto al ritardo con cui percepiamo il fenomeno, al ritardo cioè dovuto al tempo che impiega la luce per giungere fino a noi. Ma questo tempo non produce errore sensibile quando la Terra si muove in vicinanza della congiunzione o della opposizione, cioè in direzione quasi normale ai raggi luminosi, perchè la sua distanza dal satellite tra due consecutive occultazioni o emersioni varia allora pochissimo, e i ritardi con cui percepiamo due occultazioni o due emersioni successive si compensano. Ne segue che il tempo che passa tra due osservazioni, fatte mentre la Terra si trova vicinissima per esempio alla congiunzione, ci dà, con errore trascurabile, il periodo della rivoluzione del satellite: esso è di $42^h\ 28^m\ 35^s$. Supponiamo ora di fuggire la luce passando da T' per T in T''; i ritardi con i quali si osserveranno le successive emersioni vanno aumentando, e complessivamente sommano a $16^m\ 41^s, 6$ (Glasenapp): tale ritardo è eguale al tempo di cui invece anticipano complessivamente le immersioni del satellite, quando la Terra continuando nel suo moto di rotazione va incontro alla luce. Questo è dunque il tempo che i raggi luminosi impiegano a percorrere il diametro dell'orbita terrestre. Ne deriva che la luce del Sole impiega $8^m\ 20^s, 8$ per giungere fino a noi; e siccome la distanza

media della Terra dal Sole è di 148 450 000 km., per avere la velocità della luce basta dividere la detta distanza per $500^s, 8$: si ottiene circa 299000 km. al minuto secondo.

255. **Illuminazione d' una superficie.** — È un fatto ovvio che la quantità di luce che una data area riceve da una sorgente, e in conseguenza la sua *illuminazione,* diminuisce a misura che la sorgente luminosa si allontana. Supponiamo che la sorgente sia costante e irradi egualmente in tutte le direzioni, e trascuriamo le sue dimensioni rispetto alla distanza: è facile vedere che la illuminazione varia in ragione inversa del quadrato della distanza; vale a dire, se si prende come *uno* la quantità di luce che riceve in direzione normale una data superficie, 1 cm^2 per esempio, alla distanza di 1 metro, la quantità che la stessa superficie riceverà pure normalmente alla distanza di 2 metri sarà $^1/_4$; alla distanza di 3 metri sarà $^1/_9$, e così via. La ragione di questo fatto è molto chiara: indicando con Q il flusso di luce irradiato dalla sorgente nell'unità di tempo, quello che riceve normalmente l'unità di are alla distanza R, sarà

$$q = \frac{Q}{4 \pi R^2},$$

ossia la illuminazione varia in ragione inversa del quadrato della distanza a cui si trova la superficie illuminata dalla sorgente.

Si può, per es., verificare che una candela illumina un foglio bianco alla distanza di 1 metro, come 4 alla distanza di 2 metri, come 9 a 3 metri, ecc. Ma nel fare tale verifica, bisogna aver cura che i raggi arrivino, come si è detto, sensibilmente perpendicolari al foglio, altrimenti l'effetto riesce più debole. È facile infatti intendere che una su-

perficie inclinata sulla direzione de' raggi ne riceve meno che nella direzione ad essi normale: questo fatto diventa chiaro nella fig. 260, dove per semplicità si è supposto che i raggi formino un fascio parallelo; si vede che la superficie illuminata nella posizione inclinata $A\,C$ ne riceve meno che nella posizione $A\,B$ normale ai raggi, e propriamente ne riceve tanta quanta la sua proiezione $A\,D$ normale alla propagazione. Dunque una superficie illuminata riceve una quantità di luce che dipende, oltre che dalla distanza della sorgente, anche dalla inclinazione dei raggi nel modo ora detto.

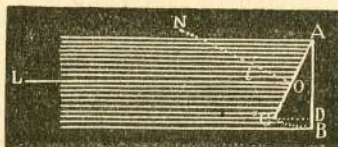


Fig. 260.

Indichiamo con I *l'intensità luminosa di una sorgente in una data direzione*, ossia *la quantità di energia luminosa che essa invia, nell'unità di tempo, sull'unità di superficie normale alla direzione stessa, posta all'unità di distanza:* una superficie poco estesa situata alla distanza d dalla sorgente, e la cui normale faccia con la direzione de' raggi un angolo d'incidenza i, riceve dalla sorgente, nell'unità di tempo, per ogni unità di superficie, una quantità di luce:

$$(1) \qquad C = \frac{I \cos i}{d^2},$$

che ne misura la *illuminazione.*

256. — **Quantità di luce emessa da una sorgente, splendore. Legge del coseno o legge di Lambert.** — Le sorgenti luminose non sono in realtà puntiformi, come per semplicità le abbiamo sin qui supposte: un elemento superficiale b che invii nella direzione della sua normale e dentro l'angolo solido elementare ω il flusso d'energia q, si può considerare come una sorgente che in quella direzione abbia la intensità $I = \frac{q}{\omega}$. Ora facendo il rapporto $\frac{I}{b}$, si vede ch'esso esprime l'*intensità normale della sorgente per unità di superficie;* tale rapporto, quando si consideri l'effetto ottico, è detto *splendore* della sorgente in quel punto. In altre parole, lo splendore in un punto esprime la quantità di luce irradiata in direzione normale dall'unità di superficie che comprende il punto considerato. Dallo splendore dipende la *chiarezza della visione.*

Il caso più semplice è che la sorgente luminosa sia un piano d'area S di splendore uniforme, come, per esempio, una lastra uniformemente arroventata, od anche uno schermo bianco che diffonda uniformemente la luce: in tal caso, dicendo E lo splendore, la luce I emessa in direzione normale è:

$$I = E\,S.$$

Per decidere poi se l'emissione dipenda o no dalla direzione dei raggi, armiamo l'occhio di un lungo tubo annerito nell'interno (fig. 261), e rivolgiamolo a quel piano. Osserviamo prima nella direzione normale, e poi in una direzione obliqua, e constateremo che non è possibile discernere alcuna differenza di chiarezza; ma nel secondo caso la superficie presenta all'apertura del tubo una mag-

giore area; dal che si conclude che i raggi emessi obliquamente, per produrre il medesimo effetto, devono essere emessi da un'area maggiore, tale cioè che la sua proiezione perpendicolare ai raggi sia costante.

Pertanto, se indichiamo con s la superficie $a\,b$, e con E (splendore normale) la luce emessa da ciascuna sua unità in direzione normale; con s' la

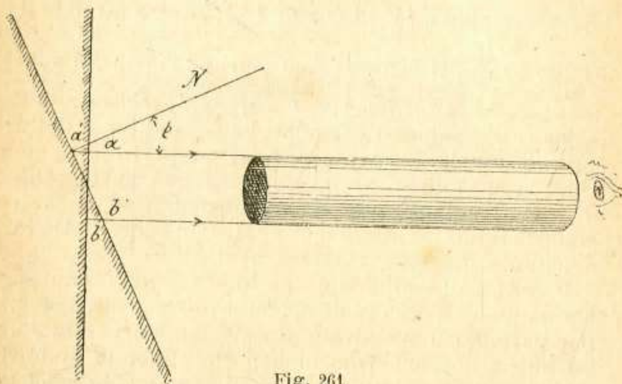


Fig. 261.

superficie $a'\,b'$ ed E' la luce irraggiata da ciascuna sua unità nella direzione obliqua e (splendore obliquo), si ha che:

$$E \,.\, s = E' \,.\, s' :$$

e poichè:

$$s = s' \cos e,$$

ne viene che:

$$E' = E \cos e.$$

Ossia la luce inviata è proporzionale al coseno dell'angolo di emissione, cioè al coseno dell'angolo

formato dai raggi con la normale alla superficie irradiante: questa legge è detta *legge del coseno* o di Lambert, e vale anche pel calore raggiante (§ 257); essa però non è applicabile ai corpi speculari, nè ai trasparenti come le fiamme o i vapori incandescenti.

Pertanto, la quantità di luce irraggiata sotto l'angolo di emissione e da una superficie S il cui splendore uniforme è E, sarà:

$$E \, . \, S \cos e;$$

e sostituendo questo valore in luogo di I nella (1) si ha:

$$C = \frac{E \, . \, S \cos e \, . \cos i}{d^2} \tag{2}$$

che dà la illuminazione C, ossia la quantità di luce che riceve, sotto la incidenza i, l'unità di area posta alla distanza d, da una sorgente piana di estensione S e di splendore E, supposto che la emissione avvenga sotto l'angolo e.

Se poi la superficie della sorgente è curva, come per esempio quella di una sfera incandescente, ricorreremo ancora all'esperienza per vedere come influisca l'obliquità dell'emissione. E constateremo che la sfera incandescente di uniforme splendore, posta ad opportuna distanza dall'occhio, ci appare come un disco egualmente luminoso in ogni punto. Lo stesso succede guardando un globo luminoso qualunque, purchè di uniforme splendore; il che significa che il flusso di luce emesso verso l'occhio dell'osservatore da ciascun elemento superficiale della sfera incandescente, del globo luminoso, è lo stesso di quello che emetterebbe la loro proiezione in una direzione normale ai raggi. Ne viene di conseguenza che alla superficie luminosa di un corpo

rotondo, e in generale ad una superficie di uniforme splendore comunque inclinata rispetto alla direzione dei corpi emessi, può sempre sostituirsi, quanto all'effetto, la sua proiezione in un piano normale alla direzione considerata.

257. **Termoattinometro del Melloni. Potere emissivo.** — Con l'apparecchio del Melloni (fig. 262) si può comodamente verificare che le leggi della propagazione del calore raggiante sono le stesse di quelle della luce. Davanti alla faccia *A* della pila

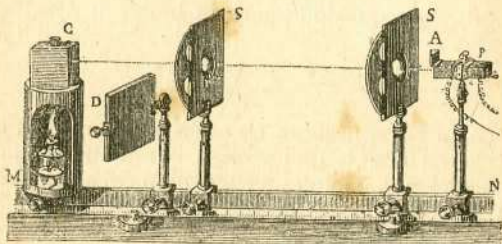


Fig. 262.

termoelettrica congiunta a un buon galvanometro [1], si dispone un cubo di rame *C* pieno di acqua od olio bollente, ovvero una lastra di rame *L* portata sui 400° da una lampada a spirito, ovvero anche una larga fiamma a ventaglio; e fra la sorgente scelta e la pila si trovano due schermi forati *S*, e un terzo schermo a doppia parete che s'inclina a gomito, il quale ha l'ufficio di proteggere, allorchè è alzato, la faccia *A* della pila dalle radiazioni della sorgente.

---

(1) Vedi Cap. Elettricità e Magnetismo.

La propagazione rettilinea del calore è dimostrata dal fatto, che l'ago del galvanometro congiunto alla pila non devia, se non quando la faccia della pila è incontrata dalla retta che passa pei fori dei due schermi.

E si può altresì verificare che l'energia calorifica nel propagarsi attraverso ad un corpo diatermano, come si può considerare l'aria, segue anch'essa la legge dell'inversa del quadrato della distanza: infatti ricorrendo ad una sorgente di piccola estensione, e togliendo ogni schermo, si troverà costante il prodotto delle deviazioni galvanometriche

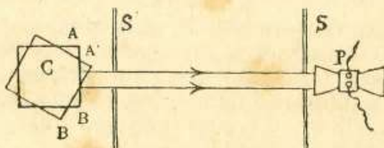


Fig. 263.

pei quadrati delle corrispondenti distanze fra la sorgente e la pila. Se la sorgente ha invece notevole estensione, la si può limitare con uno schermo solo *S* vicino alla sorgente, togliendo l'altro. Le distanze in tal caso vanno contate dal foro.

E si può con lo stesso apparecchio verificare la legge del coseno, anche per l'effetto termico. Se poniamo un cubo di rame pieno di acqua bollente davanti a una pila termoelettrica, limitando il fascio delle radiazioni con i due diaframmi forati, l'ago del galvanometro segna la stessa deviazione, comunque si inclini la faccia del cubo (fig. 263). Anche qui concludiamo che quando l'emissione

avviene obliquamente, occorre una maggior superficie per ottenere lo stesso effetto calorifico.

Con lo stesso apparecchio si dimostra facilmente che il vetro è opaco pel calore oscuro irraggiato dal cubo, e il salgemma è invece trasparente: basterà interporre fra il cubo pieno d'acqua bollente e la pila una lastrina delle suddette sostanze: con il salgemma il galvonometro devia, col vetro no.

L'esperienza poi mostra che le varie sostanze, portate alla medesima temperatura, irradiano quantità di calore diverse: è detto *potere emissivo* di una sostanza a una data temperatura la quantità di energia irraggiata, nell'unità di tempo, dall'unità di superficie.

È facile constatare che le varie sostanze, ad una medesima temperatura, irraggiano diversamente: basterà distenderne uno strato sulle faccie del cubo, e voltarle successivamente verso la pila termoelettrica, in modo che i raggi arrivino normalmente alla faccia di questa. Sperimentando così, si è trovato che il massimo potere emissivo compete al nerofumo, e che invece molto piccolo è quello delle superficie metalliche ben levigate. Il potere emissivo, come osservò il Villari, aumenta fino ad un certo limite accrescendo lo spessore dello strato; e ciò prova che l'irradiamento si fa non solo dalla superficie, ma anche dalle molecole sottoposte. Se però lo spessore aumenta oltre un certo limite, succede che il calore non viene condotto con sufficiente prontezza dall'interno allo strato superficiale, il quale assume allora una temperatura inferiore.

Il potere emissivo delle diverse sostanze aumenta con la temperatura, ma la legge dell'aumento è complessa e varia da un corpo all'altro.

Nelle esperienze qui sopra descritte la faccia della

pila esposta alla radiazione è ricoperta di nerofumo, affinchè assorba e non rifletta l'energia che vi arriva; inoltre bisogna aspettare che la deviazione galvanometrica abbia raggiunto il suo valore definitivo. Si ritiene poi che la detta deviazione sia proporzionale alla differenza di temperatura delle due faccie della pila; al quale riguardo è bene notare che la temperatura della faccia esposta alla radiazione raggiunge un valore costante, quando si verifica la compensazione tra la quantità di energia che essa assorbe e quella che in pari tempo emette. In generale, osserviamo che la perdita di energia che un corpo caldo subisce per irraggiamento in un dato luogo, è sempre la differenza tra la quantità di energia che esso emette e quella che in pari tempo assorbe dall'ambiente o da altri corpi.

Qui segue una tavola dei poteri emissivi di alcune sostanze a 100°, avendo preso come *uno* il potere emissivo del nero di fumo.

Poteri emissivi a 100° riferiti al nerofumo.

(Melloni).

Nerofumo	1,00
Carbonato piombico	1,00
Inchiostro di China	0,85
Gommalacca	0,72
Superficie metallica	0,12

(De la Provostaye e Desains).

Platino brunito	0,10
Rame laminato	0,05
Oro in foglia	0,04
Argento deposto chimicamente	0,05
Argento brunito	0,02

258. **Fotometria o misura della luce.** — Abbiamo veduto che la illuminazione di una superficie, oltre che dipendere dalla sua distanza dalla sorgente e dalla inclinazione, dipende anche, come è evidente, dalla *intensità luminosa* o *potere illuminante* della sorgente stessa: una candela, a parità di condizioni, illumina meno di una lampada a petrolio, e questa meno di una lampada elettrica.

Non si può valutare in modo assoluto la quantità di luce che irradia una sorgente nell'unità di tempo, per lo meno sarebbe estremamente difficile; ma si può sempre paragonare l'intensità sua a quella di un'altra sorgente che si prende come unità. Gli inglesi adottano come luce unitaria quella delle candele di spermaceti, da 6 alla libbra inglese, e che consumano 120 grani (ossia $7^{g},77$) all'ora; ma si è trovato che la loro intensità varia anche del 15 per cento. In Francia si adotta la lampada Carcel, di dimensioni ben determinate, che consuma 42 gr. d'olio di colza depurato all'ora; questa unità è più costante della candela inglese.

Più costante delle due ora dette è l'unità proposta da Siemens e studiata da Hefner Alteneck: essa consiste in una fiamma libera di acetato d'amile ($C_7 H_{14} O_2$), data da un lucignolo massiccio che riempie un tubetto del diam. di 0,8 cm. L'altezza della fiamma, che si giudica con un piccolo traguardo, deve essere di 4 cm.; l'intensità luminosa di questa fiamma è poco diversa da quella di una candela inglese. La tendenza moderna è di assumerla come unità di luce, e, seguendo l'uso de' tedeschi, la si dice semplicemente *candela*. Come *unità di illuminazione* poi si prende quella prodotta da tale candela sopra 1 cm^2 normalmente ai raggi, alla distanza di 1 metro. Sarebbe bene che tale uso si generalizzasse, per evitare confusioni al riguardo.

Scelto il campione, si tratta di paragonare a questo la sorgente di luce che si vuol misurare: per fare tale misura, si ricorre ai *fotometri*. Di questi ve ne sono moltissimi: uno de' più semplici è quello di Foucalt, il quale consiste in una cassetta parallelepipeda con le pareti internamente annerite, aperta sul davanti e chiusa nel fondo con uno schermo pellucido fatto di un vetro finamente smerigliato. Un tramezzo divide longitudinalmente la cassetta e lo schermo in due parti eguali *A* e *B*: si pone la sorgente unitaria davanti alla parte *A*, per esempio, ad una distanza conveniente che si mantiene fissa; poi collocando la sorgente che si vuol misurare dinanzi a *B*, se ne regola la distanza, finchè l'occhio posto dietro lo schermo pellucido giudichi che le due parti sono egualmente chiare. Le intensità delle due sorgenti stanno allora fra loro come i quadrati delle rispettive distanze dallo schermo. Difatti, dicendo I_1 e I_2 le intensità delle sorgenti, d_1 e d_2 le dette distanze, se la incidenza è normale e la illuminazione è la stessa, si ha:

$$\frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2}$$

ossia

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} .$$

Affinchè la misura sia esatta, bisogna dunque che i raggi arrivino allo schermo normalmente.

Un altro apparecchio basato sempre sulla legge dei quadrati delle distanze è il *fotometro di Bunsen* (fig. 264). Su un telaietto è teso un foglio di carta con una macchia di stearina nel centro; la macchia è più trasparente, e quindi diffonde meno la luce che non il rimanente del foglio. A seconda

dunque del modo col quale le due faccie del foglio sono illuminate, vedremo la macchia più o meno luminosa del resto della carta. Ponendo lo schermo con la macchia tra le due sorgenti, ognuna delle due pagine sarà illuminata in duplice modo, cioè direttamente dalla sorgente che le sta dinanzi, e per trasmissione dall'altra. Se una faccia è illumi-

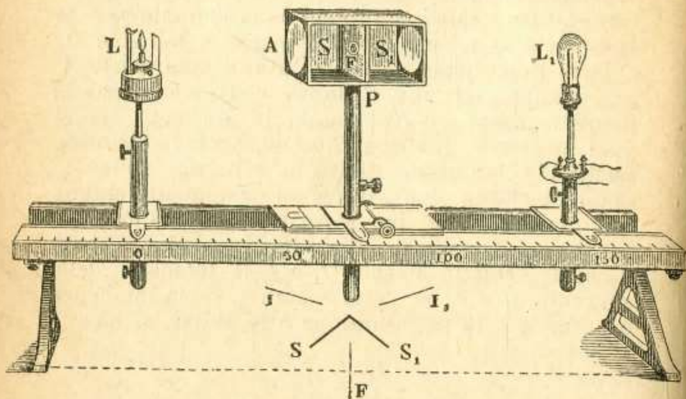


Fig. 264.

nata più fortemente dalla sorgente anteriore, la macchietta appare più oscura del fondo circostante, perchè dotata di minor potere diffusivo; se invece prevale l'illuminazione della sorgente posteriore, essa spicca più luminosa sul fondo circostante, perchè dotata di maggiore trasparenza. La macchia poi scomparirà da una parte, quando da essa e dalla zona circolare vicina l'occhio riceve la stessa quantità di luce. Ma per quanta cura vi si metta, non scompare mai contemporaneamente

da entrambe le parti; e però, nell'eseguire una misura, converrà regolare le distanze delle due sorgenti in modo che la macchia abbia lo stesso aspetto nelle due faccie: all'uopo sono predisposti due specchi piani alquanto inclinati, che per riflessione fanno vedere contemporaneamente la macchia da ambo le parti. Su un banco munito di guide e di una scala metrica si spostano le sorgenti, ovvero si muove lo schermo; in ogni caso le sorgenti devono essere alla medesima altezza, e la retta che congiunge i loro centri deve passare per

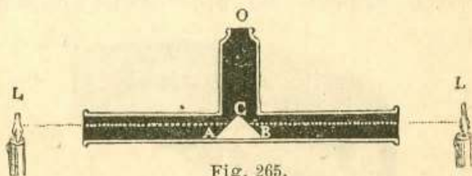


Fig. 265.

la macchia in direzione normale. Con questo fotometro un abile sperimentatore non commette errori maggiori del 2 per 100.

Come quello di Bunsen, il *fotometro di Ritschie* (fig. 265) permette di tenere le sorgenti da due parti opposte. Esso consiste in due tubi ad angolo retto, con le pareti internamente annerite: di fronte alle bocche aperte del tubo più lungo si pongono le due sorgenti da confrontare; esse illuminano le due faccie bianche *A C*, *B C* di un prisma, egualmente inclinate sull'asse del tubo. Si guarda all'estremo aperto *O* dell'altro tubo, e si regolano le distanze finchè le due faccie del prisma siano egualmente illuminate: allora lo spigolo diedro del prisma si percepisce appena. Non resta che applicare la solita legge dei quadrati delle distanze.

259. **Riflessione speculare della luce: catottrica.** — Una superficie perfettamente levigata, ben tersa, costituisce uno specchio: sono specchi le superficie dei liquidi come quelle del mercurio, dell'acqua; le superficie pulite del vetro, de' metalli. Negli specchi comuni di vetro argentato le superficie speculari sono due, quella anteriore del vetro e quella metallica; quest'ultima però è la superficie che riflette la massima quantità di luce che vi arriva attraverso al vetro.

Un raggio che cada in un punto dello specchio si riflette regolarmente; succede cioè che *l'angolo for-*

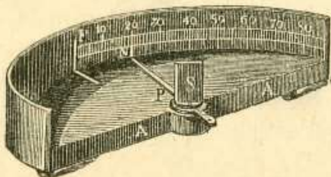


Fig. 266.

mato dal raggio incidente con la normale condotta nel punto d'incidenza (*angolo d'incidenza*) *e l'angolo analogo formato dal raggio riflesso* (*angolo di riflessione*) *sono eguali, e si trovano in un medesimo piano* (§ 251).

Questa legge si può verificare con l'apparecchio della fig. 266. Lo specchio piano S è rivolto verso la faccia concava di una mezza scatola cilindrica $A\ A$, munita di una fenditura F e di una graduazione. Lo specchio porta un indice fisso normalmente, e può ruotare intorno ad un asse che giace nel suo piano e coincide con l'asse della superficie cilindrica. Ruotando lo specchio in modo che l'indice punti per esempio verso le divisioni 20, 30, ecc., e fatto arrivare un fascetto di raggi luminosi dalla fenditura

sull'asse, si vedrà una striscia luminosa precisamente sulle divisioni 40, 60, ecc.

260. **Specchi piani.** — Vediamo ora come si formano le imagini in uno specchio piano. Sia *MM'* lo specchio, e *A* un punto luminoso collocato davanti ad esso (fig. 267); fra gl'infiniti raggi inviati da *A* allo specchio, prendiamo a considerarne uno qualunque *A B*: conducendo la normale *N B* nel punto d'incidenza, il raggio riflesso corrispon-

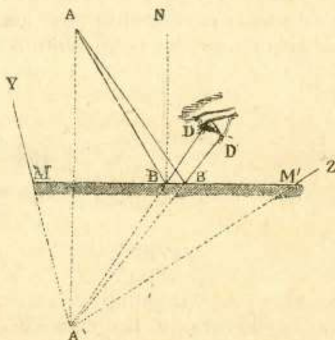


Fig. 267.

dente *B D* si troverà nel piano *ABN* e formerà con la normale l'angolo della riflessione *DBN* eguale all'angolo d'incidenza *ABN*. Ciò posto, conduciamo da *A* la perpendicolare allo specchio e prolunghiamola fino ad incontrare nel punto *A'* il prolungamento del raggio riflesso *D B*. È facile vedere che il punto *A'* è simmetrico del punto *A* rispetto al piano dello specchio *MM'*: difatti essi si trovano sulla medesima normale *AA'*, uno da una parte e l'altro dall'altra, e ad eguale distanza, ossia è *AM* uguale ad *MA'*. Ciò si deduce dai due triangoli

MAB ed *MA'B*: essi sono eguali perchè rettangoli in *M*, hanno il cateto *MB* comune e l'angolo *MAB* eguale all'angolo *MA'B*, i quali sono rispettivamente eguali all'angolo d'incidenza e all'angolo di riflessione, essendo le rette *AA'* e *NB* parallele, perchè normali ad uno stesso piano. Ciò che si è detto pel raggio incidente *AB*, vale per qualunque altro che parta da *A*; cosicchè è d'uopo inferirne che tutti i raggi riflessi prolungati si devono incrociare nel punto *A'*; questo punto è detto l'imagine di *A*, e possiamo conchiudere che *un punto luminoso e la sua imagine sono simmetrici rispetto*

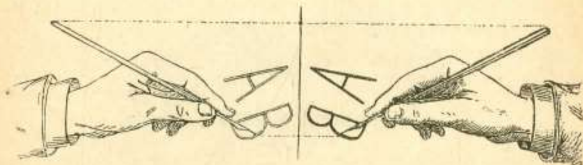


Fig. 268.

ad uno specchio piano. E poichè le impressioni dell'occhio sono determinate unicamente dalla direzione dei raggi che lo colpiscono, e in seguito a tali impressioni noi abbiamo acquistato l'abitudine di riferire i raggi ad una sorgente luminosa che si trovi in quella direzione, così l'occhio che guarda nella direzione dei raggi riflessi subisce una mera illusione e riferisce la sorgente al punto *A'*. Questo punto è un'imagine virtuale, perchè dietro allo specchio non si propaga l'energia luminosa, e non accade fenomeno alcuno che possa contribuire alla visione.

Sarà ora facile costruire per punti l'imagine di un oggetto qualunque, come rappresenta la fig. 268, la quale non ha bisogno di spiegazioni. Si

determina l'imagine conducendo semplicemente da ciascun punto dell'oggetto una perpendicolare allo specchio e prolungandola di altrettanto; si vede in questo modo che l'imagine ha sempre le stesse dimensioni e la medesima forma dell'oggetto ed è simmetrica con questo rispetto allo specchio.

261. **Applicazioni degli specchi piani.** — Si impiegano gli specchi rotanti quando si devono risolvere le fiamme manometriche vibranti (§ 168), o quando si tratta di misurare la durata di qualche fenomeno luminoso fugacissimo, com'è quello della scintilla elettrica: allora il tempo cercato sta alla durata di un giro, come la metà dell'arco descritto dall'imagine sta all'intiera circonferenza.

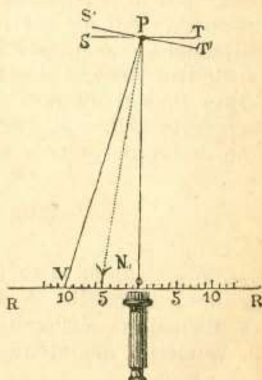


Fig. 269.

Altra applicazione degli specchi rotanti, molto più diffusa della precedente, è quella di rendere visibili e misurabili dei piccoli spostamenti, come succede, per esempio, nei galvanometri a riflessione. All'ago del galvanometro è rigidamente unito uno specchietto piano, e le piccole deviazioni vengono misurate su di una scala divisa in parti eguali, mediante un raggio luminoso riflesso dallo specchietto. La scala si pone a una distanza opportuna, parallelamente al piano dello specchio quando non è deviato; in direzione perpendicolare alla scala è collocato un cannocchiale munito di reticolo, col quale si mirano le imagini della scala riflesse dallo

specchio, e il tutto è disposto in modo che il centro del reticolo coincida collo zero della scala quando l'ago non è deviato (fig. 269). Dopo la deviazione di questo, si osserva qual punto della scala coincide col reticolo: sia, ad esempio, ST lo specchio in posizione di riposo, e poi devii insieme con l'ago e venga nella posizione $S'T'$; al raggio incidente OP non corrisponde più il raggio riflesso PO, e non si vedrà più lo zero della scala coincidere con l'incrocicchio dei fili del reticolo del cannocchiale, ma coinciderà con questo la divisione V, come indica la figura. Ora se d è la distanza della scala dal punto P, n il numero delle divisioni comprese nel segmento OV, e si prende per unità di lunghezza una divisione della scala, si ha che:

$$\text{tang}\ 2\,\alpha = \frac{n}{d}$$

essendo l'angolo $\alpha = SPS'$ descritto dallo specchio, la metà di quello descritto dal raggio; e poichè la deviazione è d'ordinario molto piccola, tang $2\,\alpha$ si avvicina grandemente a $2\,\alpha$ e si può scrivere $\alpha = \frac{n}{d}$. Se dunque si tratta di piccole deviazioni che non eccedano uno o due gradi, e la scala è, come d'ordinario, alla distanza di uno o due metri, la deviazione dell'ago del galvanometro sarà proporzionale al numero n delle divisioni della scala lette col cannocchiale.

Invece di adoperare il cannocchiale, si può dirigere da O sullo specchietto, attraverso un'apertura, un fascio di raggi luminosi, e raccogliere il fascio riflesso sulla scala, od anche sopra un cerchio graduato col centro in P. Con uno specchio piano, per aver nitida l'imagine dell'apertura, occorre in-

terporre fra la scala e lo specchio una lente convergente.

Gli specchi piani hanno altre numerose applicazioni: per esempio, ponendo uno specchietto piano nella retrobocca e inclinandolo opportunamente, se vi si dirige con un altro specchio un fascio di raggi, questi vanno a illuminare la laringe, e l'osservatore può così vederne comodamente l'imagine riflessa dallo stesso specchietto. L'apparecchio è detto *laringoscopio.*

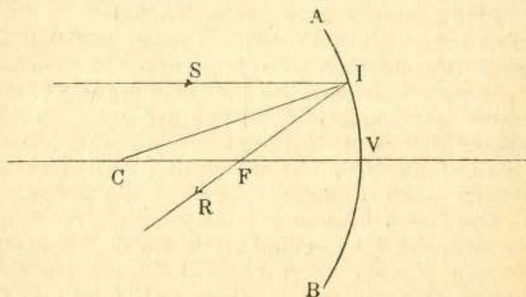


Fig. 270.

262. **Specchi sferici.** — La legge della riflessione della luce vale anche quando gli specchi sono curvi, rammentando che in tal caso la normale in un punto è la perpendicolare ivi condotta al piano tangente: trattandosi di una superficie sferica, la normale è il raggio stesso della sfera.

Fra gli specchi curvi quelli più adoperati sono appunto gli sferici, e consistono in calotte le quali formano specchi sferici concavi se sono riflettenti alla superficie interna, e specchi sferici convessi se sono speculari all'esterno.

Il vertice *V* di uno specchio sferico (fig. 270), è

detto *centro di figura;* il centro C della sfera alla quale lo specchio appartiene, *centro di curvatura:* si chiama *asse principale* la retta VC; *asse secondario* qualunque altra retta passante per C e quindi normale allo specchio. La sezione AVB fatta con un piano passante per l'asse principale è una *sezione principale* dello specchio; *apertura* dello specchio è l'angolo ACB, che ha per misura il rapporto dell'arco AB al raggio CV.

263. **Specchi sferici concavi.** — Studiamo prima la riflessione sugli specchi concavi.

Supponiamo che un fascio di raggi paralleli all'asse principale cada sullo specchio AB, e fra essi prendiamo a considerarne uno qualunque SI: conduciamo la normale CI nel punto I; l'angolo SIC è l'angolo dell'incidenza; per avere il raggio riflesso corrispondente IF, basterà quindi costrurre nel medesimo piano l'angolo CIF uguale all'angolo SIC. Ora, evidentemente, il triangolo FIC è isoscele, cosicchè FI è uguale a FC. Ma se lo specchio avrà una piccola apertura, la differenza tra FI e FV sarà molto piccola, e allora ne risulta che F è prossimamente il punto di mezzo del segmento VC.

E poichè lo stesso può dirsi di qualunque altro raggio parallelo e vicino all'asse principale, ne seguirà che i raggi riflessi corrispondenti ad un fascio di raggi incidenti paralleli all'asse, se l'apertura dello specchio è piccola, s'incontreranno tutti sensibilmente in uno stesso punto F dell'asse, equidistante dallo specchio e dal suo centro di curvatura. Questo punto è detto *fuoco principale*, e si chiama *distanza focale* il segmento FV uguale alla metà del raggio di curvatura.

Se il fascio incidente fosse formato da raggi paralleli a un asse secondario, il risultato sarebbe lo stesso: i raggi riflessi formerebbero sempre il

loro fuoco su l'asse secondario in un punto equidistante dallo specchio e dal centro di curvatura. L'insieme di tutti questi fuochi formerebbe una superficie sferica concentrica a quella dello specchio e di raggio CF; la quale, se l'apertura è ben piccola, si confonderà sensibilmente con un piano perpendicolare all'asse nel punto F: tale piano è detto *piano focale*. Come verifica di questo fatto rivolgiamo al sole uno specchio concavo, e ricercando con un piccolo schermo ove il fascio riflesso abbia la minima sezione, troveremo un piccolo circolo splendidissimo che è l'imagine del sole. Questo è così lontano da noi, che si possono considerare paralleli i raggi provenienti da ogni suo punto; perciò ai raggi emessi da ciascun punto del sole corrisponde un fascio conico di luce riflessa col vertice sul rispettivo asse secondario, e tali vertici si trovano tutti sensibilmente sopra uno stesso piano, che è il piano focale. L'imagine del sole così ottenuta è una *imagine reale*, perchè è prodotta dal reale incrociamento dei raggi, e non dal loro prolungamento, come negli specchi piani; una materia infiammabile posta nel piano focale dello specchio, supposto sempre rivolto al sole, prende fuoco ben presto.

Conosciuta la proprietà del fuoco, vediamo ora come si possa costrurre graficamente la imagine di un punto luminoso M posto dinanzi ad uno specchio concavo. I raggi emessi dal punto M, dopo la loro riflessione sullo specchio, se questo ha piccola apertura come del resto noi sempre supporremo, concorreranno tutti in un medesimo punto, che si dice *coniugato*, o imagine di M: per trovarlo condurremo il raggio MC normale allo specchio (fig. 271), esso si rifletterà su sè stesso: poi tireremo il raggio MI parallelo all'asse principale, che si rifletterà passando per il fuoco e incontrerà

l'asse secondario in M': questo punto è dunque il coniugato o l'imagine di M, e sarà, nel nostro caso, una imagine reale. I due piani poi MP, $M'P'$ condotti perpendicolarmente all'asse principale pei due punti M ed M', sono anch'essi coniugati; tali cioè che a qualunque punto preso sul primo corrisponde un punto coniugato sul secondo: si vede che due punti coniugati si trovano sempre per diritto con il centro C dello specchio. E se MP rappresenta un oggetto, una retta luminosa p. es., perpendicolare all'asse dello specchio, $M'P'$ ne è la imagine: viceversa, se $M'P'$ è l'oggetto, MP è la sua imagine.

Fig. 271.

Nel caso ora detto, l'imagine è reale perchè formata dal reale concorso de' raggi; è capovolta e si può accogliere su uno schermo. Ma l'imagine fornita da uno specchio concavo diventa virtuale ed è diritta, quando l'oggetto è posto tra il fuoco F e il vertice V dello specchio, come indica la fig. 272, dove MP è l'oggetto e $M'P'$ l'imagine. Questa si costruisce con la stessa regola, e si forma dietro

lo specchio sul prolungamento de' raggi riflessi: bisogna quindi, per vederla, mettere l'occhio sulla via di detti raggi; evidentemente essa non si può proiettare.

Ora, dicendo y la dimensione MP dell'oggetto, y' la dimensione omologa $M'P'$ dell'imagine, z e z' le loro distanze rispettive dal fuoco dello specchio, f la distanza focale, si hanno facilmente fra queste

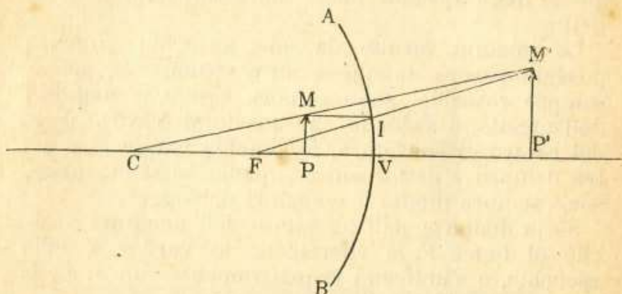


Fig. 272.

grandezze, considerando le coppie dei triangoli simili MCP, $M'CP'$ e $M'P'F$, IVF le due relazioni seguenti:

$$zz' = f^2 \, ; \; \frac{y'}{y} = \frac{z'}{f} = \frac{f}{z}.$$

Queste eguaglianze, poste sotto la forma

$$z' = \frac{f}{z} \cdot f ; \quad y' = \frac{f}{z} \cdot y$$

servono a trovare la posizione e la grandezza della imagine, quando è data la posizione e la grandezza dell'oggetto. Se ne deduce, fra le altre cose, che finchè z è positivo, ossia finchè l'oggetto si trova a

sinistra del fuoco, anche z' è positiva, e l'imagine si trova pure a sinistra del fuoco. Ma se z diventa negativa, vale a dire l'oggetto passa fra il fuoco F e lo specchio, allora anche z' deve essere necessariamente negativa, e l'imagine, come si è già detto, diventa virtuale, sarà cioè formata dal prolungamento dei raggi. Si vede che le *imagini virtuali* fornite dagli specchi concavi sono diritte come quelle degli specchi piani, ma più grandi dell'oggetto.

Le imagini fornite da uno specchio concavo possono essere dunque reali e virtuali: le prime, sempre rovescie, sono minori, eguali, o maggiori dell'oggetto, a seconda che questo si trovi al di là del centro di curvatura, o coincida con esso, o sia tra il fuoco e detto centro; quelle virtuali invece sono sempre diritte e maggiori dell'oggetto.

Se le distanze dell' oggetto e dell' imagine, anzichè al fuoco F, si riferiscono al vertice V dello specchio, e s'indicano rispettivamente con x, x', le equazioni suddette diventano:

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{x'}=\frac{1}{f}\,;\quad \frac{y'}{y}=\frac{f}{x-f}$$

come è facile vedere ponendo nelle precedenti

$$z=x-f,\quad z'=x'-f.$$

Quanto al segno, x ed f sono positive, x' è positiva se contata dinanzi allo specchio, cioè se la imagine è reale, negativa se l'imagine è virtuale.

Il calore raggiante si riflette come la luce: una riprova si ha con gli *specchi ustori*, formati da specchi concavi, che rivolti al sole concentrano i raggi nel loro fuoco e provocano, come si è notato, l'accensione di materie infiammabili che vi si tro-

vano. Si possono anche mettere di fronte due di tali specchi con l'asse comune (fig. 273); ponendo nel fuoco di uno di essi una sorgente di calore di conveniente estensione, si produce nel fuoco dell'altro specchio una concentrazione di raggi calorifici, che si può constatare collocandovi, sia un termometro, sia una materia infiammabile. La quale esperienza prova che il calore raggiante si riflette come la luce.

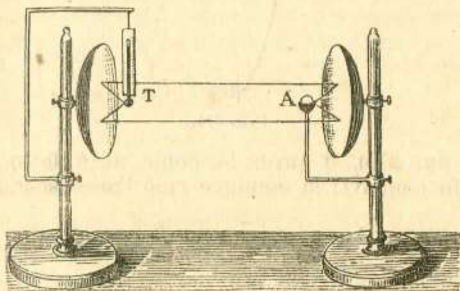


Fig. 273.

264. **Specchi sferici convessi.** — Negli specchi sferici convessi le posizioni del fuoco e delle imagini si trovano come negli specchi concavi, ma il fuoco e le imagini date da tali specchi sono virtuali.

La fig. 274 mostra come un fascio di raggi incidenti paralleli all'asse principale dia luogo ad un fascio di raggi riflessi, che prolungati concorrono in un punto F al di là dello specchio. Il fuoco è dunque virtuale e si dimostra, come negli specchi concavi, ch'esso coincide prossimamente col punto di mezzo del segmento CV.

Per determinare poi graficamente la imagine *M' P'* di un oggetto *M P* posto dinanzi allo spec-

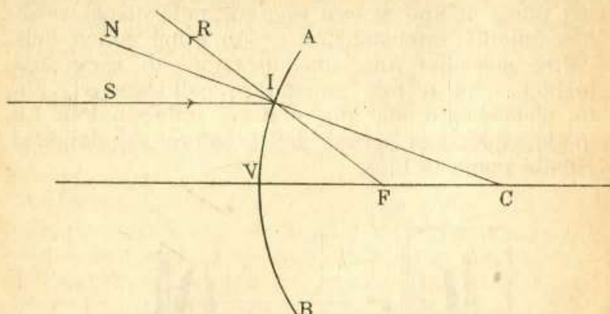


Fig. 274.

chio (fig. 275), si procede come si è fatto negli specchi concavi: si conduce cioè l'asse secondario

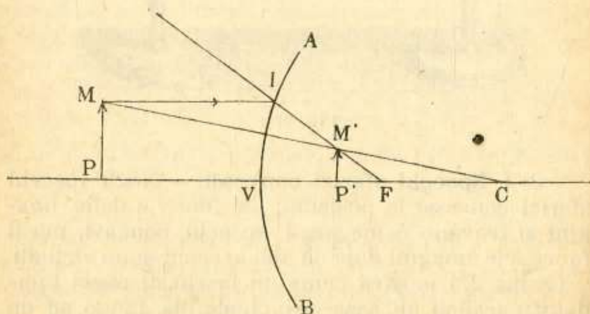


Fig. 275.

MC e il raggio *MI* parallelo all'asse, il quale si riflette dinanzi allo specchio in una direzione che prolungata passa pel fuoco *F*; il punto d'incontro

M' di questo raggio riflesso con l'asse secondario MC è il coniugato di M. Conducendo poi dai punti M ed M' le normali all'asse principale, si ha che $M'P'$ è l'imagine di MP. La quale è dunque virtuale, diritta, più piccola, e si forma sempre tra il fuoco e lo specchio. Guardando in quei palloncini di vetro che si usano come ornamento, vediamo cosiffatte imagini virtuali, sempre diritte e più piccole degli oggetti.

In questi specchi, essendo la distanza focale f e la distanza x' dell'imagine entrambe negative, perchè contate in senso contrario alla distanza positiva x dell'oggetto, le relazioni fra queste distanze riferite al vertice V, e le dimensioni omologhe y e y' dell'imagine e dell'oggetto, diventano:

$$\frac{1}{x} - \frac{1}{x'} = -\frac{1}{f}; \quad \frac{y'}{y} = \frac{-f}{x+f}.$$

Si vede che è sempre $y' < y$.

265. **Rifrazione della luce. Riflessione totale.** — Quando un raggio di luce passa da un mezzo ad un altro, segue il cammino rettilineo solamente nel caso che la sua direzione coincide con la normale alla superficie di separazione de' due mezzi; in ogni altro caso si *rifrange*, prende cioè nel secondo mezzo una nuova direzione, detta *raggio rifratto.*

Rappresenti MM' (fig. 276) il piano orizzontale che separa l'aria dall'acqua, e arrivi in N un raggio IN che faccia con la normale l'angolo d'incidenza INP, che indicheremo con i. Questo raggio invece di progredire nella direzione INI', in parte si riflette regolarmente secondo NT, e in parte passa nel secondo mezzo e dà luogo al raggio rifratto NR; questo fa con la normale l'angolo della rifrazione RNP' che indicheremo con r. Se il

raggio rifratto si accosta alla normale, come succede nel nostro caso, si dirà che il secondo mezzo (acqua) è più rifrangente del primo (aria).

Facendo centro nel punto d'incidenza, descriviamo una circonferenza con raggio eguale all'unità: essa incontrerà il raggio incidente e il raggio rifratto rispettivamente nei punti A e C; tiriamo da questi punti le perpendicolari AB, CD sulla PP'; AB è detto il seno dell'angolo i d'incidenza, CD

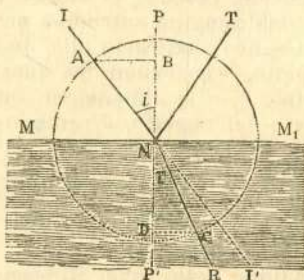


Fig. 276.

il seno dell'angolo r di rifrazione. Ora l'esperienza prova che: 1° *il raggio rifratto è sempre nel piano formato dal raggio incidente e dalla normale;* 2° *il seno dell'angolo d'incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione sono, con una data luce, in un rapporto costante per gli stessi due mezzi, indipendente dalla inclinazione dei raggi.*

Si dà il nome di *indice di rifrazione* a tale rapporto: l'indice non dipende che dalla natura dei mezzi e dalla qualità della luce. Il suo valore è $\frac{4}{3}$ per l'aria e l'acqua, e per i raggi giallo-verdastri; $\frac{3}{2}$ per l'aria e il vetro, e gli stessi raggi. Esso ha

un significato importante, perchè esprime il rapporto della velocità della luce nei mezzi a cui si riferisce; ossia, se si dice 4 la velocità della luce nell'aria, 3 è la sua velocità nell'acqua, ecc.

La legge suddetta della rifrazione della luce è dovuta a Snellius, fisico olandese; ma è detta anche legge di Cartesio, che la verificò.

Si può mostrare questo importante fenomeno con l'apparecchio della fig. 277, il quale è costituito da

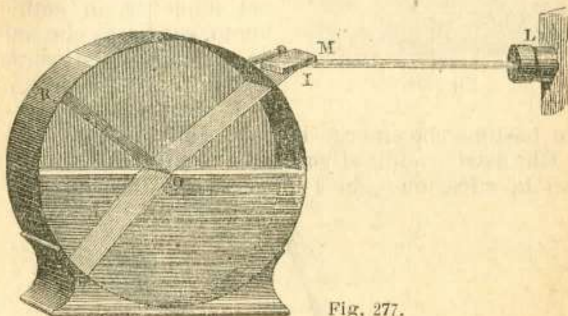


Fig. 277.

un tamburo avente una faccia di vetro; per una stretta fenditura, inclinando convenientemente uno specchio piano *S*, si fa penetrare nell'interno un fascio di luce. Questo fascio incidente *IO* dà origine al fascio riflesso *OT* ed al fascio rifratto *OR*, dei quali si può seguir bene il cammino impregnando l'aria con un po' di fumo, e aggiungendo all'acqua o un po' di latte o una sostanza fluorescente.

Il raggio luminoso si avvicina alla normale, se passa dall'aria nell'acqua o nel vetro: succede l'opposto nel passaggio inverso. Per tale ragione gli oggetti immersi nell'acqua si vedono spostati e ri-

alzati come indica la fig. 278; difatti i raggi emessi da un punto *A* emergono con una inclinazione maggiore, e formano un fascio divergente che prolungato concorre nel punto *A'*, dove quindi l'occhio riferirà la posizione di *A*. È per questo che guardando obliquamente una moneta posta nel fondo di un catino vuoto, sembrerà che salga quando vi si versa dell'acqua; e così anche sembrerà spezzato un bastone che emerge in parte dall'acqua (fig. 279).

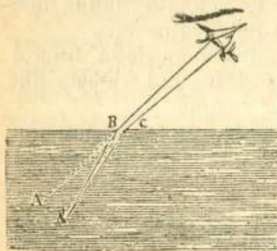
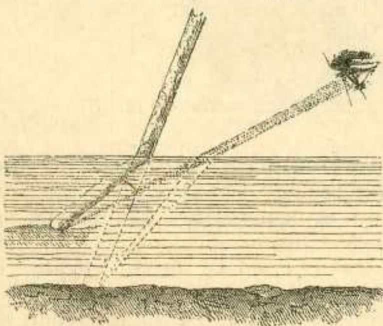


Fig. 278.

Gli astri vicini all'orizzonte sembrano più alti per la rifrazione che i loro raggi subiscono nell'atmosfera; difatti essi descrivono nell'aria, anzichè una retta, una linea curva volgente la concavità verso il piano dell'orizzonte.


Fig. 279.

Bisogna ora chiaramente figurarsi nella mente questo fatto, che i raggi di luce compresi nell'aria in un angolo retto (fig. 280), nell'acqua si trovano ristretti, per così dire, in un angolo di 48° 35′, valore massimo dell'angolo *r*. Se sott'acqua si trova un punto luminoso *P*, i raggi prossimi alla normale *PO* usciranno nell'aria con una intensità maggiore di quelli obliqui, pei quali si accentua sempre più la riflessione: quando la incidenza raggiunga o su-

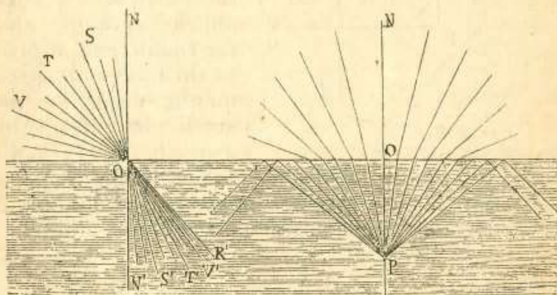


Fig. 280.

peri l'angolo di 48° 35′, i raggi più non emergono e si *riflettono totalmente;* per questa ragione l'angolo in discorso è detto *angolo limite.* Per l'aria e il vetro l'angolo limite è di 42°; cosicchè un raggio che cade normalmente sulla faccia cateta di un prisma retto di vetro, la cui base sia un triangolo rettangolo isoscele, si riflette totalmente in *E* sulla faccia ipotenusa, ed esce normalmente all'altra faccia cateta (fig. 280).

Lo splendore argenteo delle incrinature dei bicchieri, il candore della neve e della schiuma del mare, sono dovuti alla riflessione totale. Con essa

si spiega anche il *miraggio*, che spesso si verifica nei deserti, e per il quale si ha l'illusione dell'acqua. In tal caso, a cagione del forte calore del suolo, è perturbata la ordinaria distribuzione della densità degli strati di aria, di modo che questa è più densa in alto che a contatto del suolo. Può allora avvenire che un raggio che si propaghi molto obliquamente, passando da strati più rifrangenti a quelli che lo sono meno, subisca la riflessione totale, come mostra la fig. 282; e, per conseguenza, un occhio che è in *O* vede contemporaneamente un punto luminoso

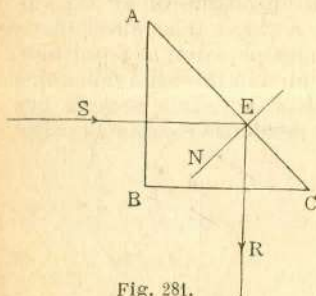


Fig. 281.

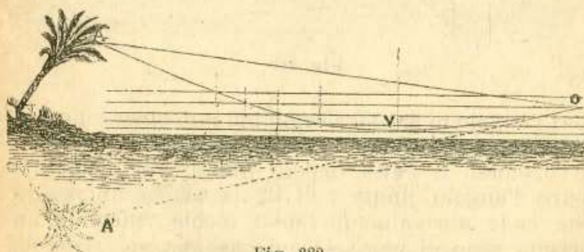


Fig. 282.

in *A* e in *A'*, subendo così l'illusione della presenza dell'acqua.

266. **Rifrazione attraverso ad una lastra e a un prisma. Analisi della luce.** — Con una lastra piana di vetro di qualche grossezza, un raggio di

luce monocromatica, cioè di un sol colore, seguirebbe il cammino indicato dalla fig. 283. Si vede che esso si rifrange nell'atto di entrare nella lastra, e si rifrange ancor dopo nell'atto di uscirne; tuttavia queste due rifrazioni essendo eguali e di opposto verso, la direzione del raggio emergente risulta parallela a quella del raggio incidente sulla lastra; laddove il raggio rifratto nell'interno di questa ha una direzione diversa. Supponiamo ora che si abbia non più una lastra ma un prisma triangolare di vetro; e poniamo che esso stia con lo spigolo *A* volto all'insù, e con la faccia opposta *B C* in basso.

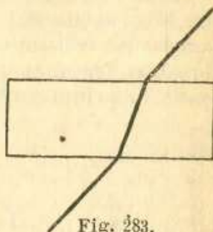


Fig. 283.

La fig. 284 mostra in che modo un raggio *S I* di luce monocromatica venga rifratto nell'entrare e

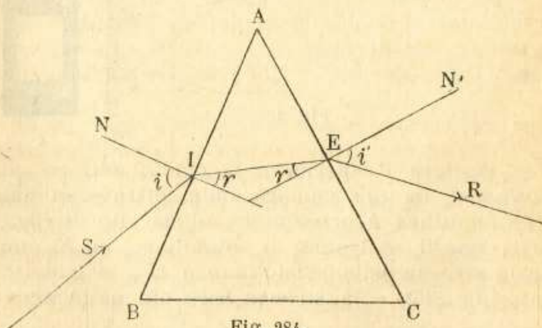


Fig. 284.

nell'uscire dal prisma; cosicchè il raggio *E R* che esce dal prisma, risulta deviato verso la base *B C* di questo.

Così vanno le cose quando si tratta di un raggio di luce monocromatica: ma se la luce incidente è quella del sole, di una lampada, allora all'unico raggio di luce bianca incidente corrisponde una infinità di raggi che sono diversamente rifratti, e formano alla loro uscita dal prisma una specie di ventaglio vagamente colorato de' colori dell'iride. Questo importante fenomeno, detto *dispersione della luce*, venne la prima volta studiato da Newton.

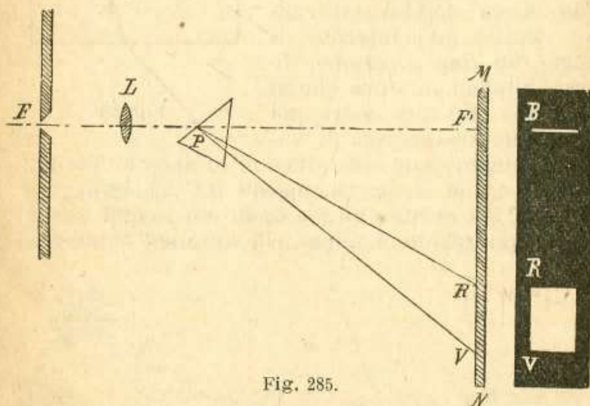


Fig. 285.

Per ripetere l'esperienza, facciamo entrare col *portaluce* (¹) in una camera buia, attraverso una sottile fenditura F orizzontale, un fascetto di raggi solari; questi andranno a illuminare in F' una piccola striscia della parete bianca che si trova di fronte (fig. 285), e la striscia sarà più netta acco-

(¹) Il portaluce è uno specchio che ruotando intorno a due assi ad angolo retto, può ricevere una inclinazione conveniente, per riflettere nella direzione che si vuole un fascio di raggi luminosi.

gliendo la luce in una lente convergente *L*. Interponiamo sul tragitto del fascio luminoso un prisma *P* di vetro cogli spigoli paralleli alla fenditura, e il vertice in alto: se l'incidenza è opportuna, vedremo allora il fascetto luminoso non solo deviare verso la base del prisma, ma di più aprirsi a guisa di ventaglio, dando una imagine della fenditura in *R V*, allungata nel senso verticale e vagamente ornata dei colori dell'iride, col rosso *R* meno deviato in alto e il violetto *V* più deviato in basso.

Un raggio bianco dà origine pertanto ad una infinità di raggi diversamente rifrangibili, aventi cioè diversi indici di rifrazione; e questi raggi producono le differenti sensazioni dei colori, de' quali il meno rifrangibile è il rosso, e il più rifrangibile è il violetto. L'imagine colorata e dilatata della fenditura è detta *spettro solare*.

Noi sappiamo già che le onde eteree emesse dai corpi luminosl non hanno tutte la stessa lunghezza, ma le rosse sono le più lunghe e le violette le più brevi. Accade di tali onde che nelle sostanze rifrangenti, le più lunghe sono meno ritardate e quindi meno rifratte; tale è la causa della dispersione.

Si sogliono distinguere con Newton sette colori principali nello spettro, che si succedono nell'ordine seguente: *rosso, aranciato, giallo, verde, turchino, indaco, violetto,* andando dal meno al più rifrangibile. Questa divisione però è arbitraria, perchè non esiste un netto confine fra due colori successivi, ma si passa dall' uno all' altro per una infinità di sfumature lievissime: così, per esempio, fra il giallo e il verde si potrebbe intercalare il *giallo verdastro*; fra l'azzurro e il verde, l'*azzurro verdastro*; fra l'azzurro e l'indaco, il *bleu-indaco*, ecc.

Se si guarda il fascio aperto a ventaglio alla sua

emergenza dal prisma, si vede ch'esso offre una gradazione di colori simile a quella osservata sulla parete bianca: si tocca per così dire con mano che all'unico fascetto bianco che entra nel prisma, corrisponde una moltitudine di raggi luminosi diversamente colorati e inclinati sulla direzione del fascio incidente. Ciascun colore dello spettro è semplice: infatti se per un foro praticato sullo schermo su cui cade lo spettro, facciamo passare i raggi di un sol colore, i rossi, per esempio, e li accogliamo sopra un altro prisma posto dietro lo schermo, vedremo l'esile fascetto rifrangersi di

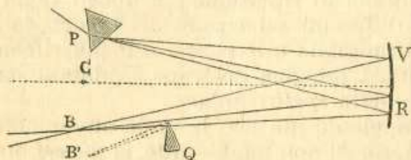


Fig. 286.

nuovo, ma non disperdersi; dimodochè su un altro schermo andranno a cadere delle radiazioni rosse identiche alle incidenti. Un fascio formato di raggi omogenei, ossia della stessa rifrangibilità, costituisce un *colore semplice*.

Se la luce solare è realmente composta dei raggi variamente colorati che formano lo spettro, facendoli convergere tutti in un punto si dovrà ricostituire la luce bianca. Ciò infatti riesce assai bene adoperando uno specchio concavo, o una lente biconvessa, oppure portando lo schermo vicinissimo al prisma. Se nel fare questa esperienza con uno specchio concavo (fig. 286), si arresta, oppure si fa deviare col mezzo di un piccolo prisma Q, una porzione del fascio riflesso, gli altri raggi conver-

gendo non formeranno più la luce bianca: facendo, per esempio, deviare i raggi rossi, gli altri raggi convergendo in un punto formeranno una luce verdastra. Questo verde composto è un *colore complementare* del rosso, perchè col rosso darebbe il bianco; così il violaceo è complementare dell'aranciato.

Si può anche destare la sensazione del bianco facendo arrivare all'occhio tutti i raggi dello spettro con una successione abbastanza rapida, facendoli cioè riflettere da uno specchio piano che ruoti o che oscilli: allora, per la *persistenza delle imagini sulla retina*, tutto accade come se le eccitazioni successive de' vari raggi fossero simultanee, ossia si fondono in un'unica sensazione.

La stessa esperienza si fa anche con il disco di Newton: è questo un disco diviso in settori, dipinti coi colori dello spettro succedentisi nello stesso ordine; quando il disco è fatto rapidamente ruotare, per il fenomeno suddetto della persistenza delle imagini sulla retina, le imagini dei diversi colori dello spettro si sovrappongono e si desta la sensazione del bianco. La persistenza delle imagini spiega pure perchè noi vediamo un circolo luminoso quando facciamo nell'oscurità girare rapidamente un carbone acceso, e perchè una corda che vibra ci pare rigonfia come un fuso, ecc.: la persistenza delle imagini però non dura più di $^1/_{10}$ di secondo circa, e quindi per riuscire a destare la sensazione del bianco col disco di Newton, bisogna che esso giri con una sufficiente velocità.

Ma si può veder bianco anche per la sovrapposizione di due soli colori dello spettro, per esempio, del rosso e dell'azzurro verdastro, dell'aranciato e dell'azzurro; e così ogni colore ha il suo compagno, insieme al quale, arrivando simultaneamente all'occhio, vi desta la sensazione del bianco.

267. **Colori dei corpi per diffusione.** — I corpi che non sono luminosi di per sè stessi, noi li vediamo mercè i raggi che ricevono da sorgenti di luce, e che diffondono in tutte le direzioni. Li vediamo bianchi o grigi quando diffondono tutti i raggi nella stessa misura, e li vediamo neri quando, al contrario, li assorbono tutti; ma quando, esercitando un'azione elettiva, essi assorbono alcune radiazioni e diffondono le rimanenti, dobbiamo vederli colorati. Se, per esempio, un corpo ci appare verde, ciò significa ch'esso assorbe i raggi luminosi di tutte le altre rifrangibilità e rinvia di preferenza quelli verdi.

Dobbiamo inoltre ritenere che siffatto assorbimento dell'energia abbia luogo non alla superficie che rifletterà sempre un po' di luce bianca, ma in uno spessore estremamente tenue, poichè uno straterello simile staccato dal corpo sarebbe permeabile alla luce. Ricordiamo a tale riguardo la trasparenza per certe luci delle sottili foglie metalliche.

Produciamo uno spettro, e proiettiamolo sopra schermi diversi: se lo schermo è bianco, vi si scorgono le varie gradazioni de' colori con le medesime intensità relative, come se si osservassero direttamente; se invece lo schermo è nero, tutte le luci si estinguono allo stesso modo. Ma se lo schermo è colorato, verde per esempio, noi vedremo questo colore assai vivo, un po' di turchino e un po' di giallo, mentre tutte le altre radiazioni vengono estinte. Analogamente, su uno schermo di color rosso non si scorge che il rosso molto intenso, e un po' di aranciato. Il fatto del comparire sullo schermo colorato i colori vicini a quello proprio, prova che i colori de' corpi dovuti a diffusione sono composti.

Ora è facile spiegare in qual modo i pittori riescano a formare la tinta verde, mescolando un pigmento azzurro con uno giallo, mentre i raggi azzurri dello spettro uniti ai gialli destano la sensazione del bianco. Le polveri non diffondono mai della luce monocromatica; il pigmento giallo diffonde abbondantemente i raggi gialli e verdi, e assorbe i turchini e i violetti; quello azzurro diffonde invece i raggi azzurri e verdi, e assorbe i rossi e i gialli; cosicchè nella luce diffusa rimane predominante il verde.

268. **Colori de' corpi visti per trasparenza.** — Non hanno origine diversa i colori de' corpi visti per trasparenza; i corpi colorati esercitano un'azione elettiva sulla luce che li attraversa, assorbendo certe radiazioni e trasmettendo le altre. Il vetro rosso, per esempio, è trasparente pei raggi meno rifrangibili dello spettro, ed è quasi opaco pe' raggi verdi, azzurri e violetti; il vetro di cobalto, turchino per trasparenza, assorbe quasi tutto il giallo e il rosso meno una striscia, e una parte del verde. Se tra la fenditura e il prisma, nella esperienza della fig. 285, o fra questo e lo schermo, interponiamo una lastra di vetro rosso, vedremo nello spettro risplendere vivamente il rosso e un po' l'aranciato, mentre tutte le altre luci rimangono estinte. Analogamente, ponendo sulla via de' raggi luminosi una lastra di vetro verde, non sarebbero trasmessi che i raggi verdi e un po' i turchini. Sovrapponendo questi due vetri, si ha un sistema quasi opaco, perchè uno de' vetri non trasmette le luci che l'altro lascia passare. Così resta chiarito che una sostanza per certi raggi può esser trasparente, per certi altri invece opaca. Le radiazioni assorbite vengono estinte come luce, ma si trasformano in energia termica, come prova il riscaldarsi del corpo che

le assorbe, ovvero in altre specie di energia come vedremo. Anche la luce che passa attraverso ai mezzi colorati, è in generale composta.

269. **Raggi calorifici oscuri e raggi ultravioletti.** — Oltre ai raggi luminosi, fanno parte dello spettro solare altri raggi non visibili: sono questi i raggi *oscuri calorifici*, meno rifrangibili dei raggi rossi, e i *raggi attinici* o *chimici* più rifrangibili del violetto.

Se si porta un termometro col bulbo affumicato o meglio una pila termoelettrica nelle varie regioni dello spettro, andando gradatamente dal violetto verso il rosso, si trova che l'effetto calorifico, trascurabile nel violetto e nel turchino, va crescendo notevolmente dal verde al rosso, dove raggiunge l'intensità maggiore, nello spettro luminoso. Portando poi il termometro o la pila di là del rosso dove l'occhio nulla scorge, il calore aumenta ancora e raggiunge il suo massimo a qualche distanza da questo colore. In seguito l'intensità calorifica diminuisce, e si estingue a poco a poco. Ma poichè il vetro assorbe gran parte del calore oscuro, è necessario servirsi in queste misure, per proiettare lo spettro, di una lente e di un prisma di salgemma, che è una sostanza perfettamente diatermana.

Il calore che viene dal sole, e così pure quello delle sorgenti artificiali, è nella maggior parte oscuro: il rapporto del calore luminoso al calore totale irraggiato, varia con la natura e la diversa temperatura delle sorgenti: secondo Tyndal, la radiazione luminosa non è che $\frac{1}{25}$ della radiazione complessiva in una fiamma a gas delle più splendide, la cui temperatura può stimarsi a 1500 gradi: arriva invece ad $\frac{1}{5}$ della complessiva nelle lam-

pade ad arco, dove si raggiungono temperature da 3000° a 4000°.

Diciamo ora due parole dei raggi ultra-violetti. Tutti conoscono gli effetti chimici della luce solare, sulla quale è fondata l'arte fotografica. Se si raccoglie lo spettro sopra una lastra sensibile fotografica e la si difende da ogni altra luce, si trova che l'impressione si estende dalla linea *E* di Fraunhofer fino al di là dell'estremo violetto, per un tratto eguale all'incirca a tutto quello che si vede: e l'impressione è solcata, oltre che dalle righe note della regione visibile, anche da altre righe nella invisibile, le più forti delle quali furono contrassegnate con le lettere *L*, *M*, *N*, ecc.

Esiste dunque al di là del violetto estremo un'infinità di raggi invisibili atti a produrre azioni chimiche, e per tale ragione sono detti anche raggi chimici.

Le sorgenti di luce che hanno relativamente una bassa temperatura sono povere di tali raggi; invece la luce elettrica e quella del magnesio ne sono ricchissime. Il quarzo è un corpo assai trasparente, molto più del vetro, per tali raggi.

Alcune sostanze li assorbono e diventano luminose per fluorescenza: il vetro di uranio emette una luce color verde pisello, quando è colpito da tali radiazioni; la soluzione di solfato acido di chinina risplende di un bel color celeste; il platino cianuro di bario acquista una tinta verdastra, ecc. Se si *filtra* la luce del sole attraverso a un vetro di color violetto e si fa cadere questa luce sull'acqua contenente pezzetti di corteccia verde di ippocastano appare un bleu cielo bellissimo, dovuto pure a un effetto di fluorescenza. Accogliendo uno spettro puro del sole sopra uno schermo di carta, preparato con platino cianuro di bario si osserva un'estensione

notevole dello spettro nell' ultra-violetto dovuta a un effetto di fluorescenza.

Come quello del sole, così anche lo spettro delle altre sorgenti luminose, è sempre formato, con diverse proporzioni però, dalle tre specie di raggi ora dette: raggi calorifici oscuri, raggi luminosi e raggi attinici o ultra-violetti. L'estensione, la copia di ciascuna specie di tali raggi, dipende dalla natura della sorgente e dalla sua temperatura; così la luce delle ordinarie fiamme è relativamente ricca di raggi oscuri e di quelli luminosi meno rifrangibili; la luce elettrica invece è ricchissima di raggi luminosi più rifrangibili e di quelli ultra-violetti.

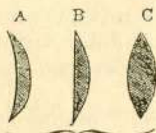


Fig. 287.

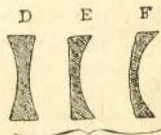


Fig. 288.

270. **Lenti.** — Studiamo ora la rifrazione dei raggi luminosi attraverso ad una sostanza diafana terminata da superficie curve: un mezzo così fatto costituisce una *lente*. Le lenti sono ordinariamente di vetro, terminate da due superficie sferiche e immerse nell'aria: talora una superficie è piana.

Esse sono *convergenti* (fig. 287) o *divergenti* (fig. 288), secondo che fanno convergere o divergere un fascio di raggi paralleli, come si può riscontrare facendo cadere su esse un fascio di raggi solari, e osservando i pennelli luminosi emergenti. Sono convergenti le lenti *biconvesse C*, che hanno cioè le due superficie convesse; quelle *piano convesse B* con una superficie piana e l'altra convessa;

quelle *concavo-convesse A* (menisco convergente) con una superficie concava ed una convessa, quest'ultima avendo la maggiore curvatura. Le lenti convergenti sono più grosse verso il mezzo che all'estremità.

Sono divergenti le lenti *biconcave D* con le due superficie concave; quelle *piano-concave E* con una superficie piana e l'altra concava; e quelle *concavo-convesse F* (menisco divergente) con una superficie convessa e l'altra concava, questa essendo più curva; le lenti divergenti hanno verso il mezzo, al contrario delle convergenti, uno spessore minore che all'estremità.

Si chiama *asse cardinale* di una lente la retta che passa pei centri delle sfere alle quali le superficie appartengono: esso è normale alle due superficie.

La teoria generale delle lenti esce dai modesti confini di un manuale come questo, e dobbiamo contentarci di considerare solamente quelle lenti che sono di spessore trascurabile, e che di più siano limitate da calotte sferiche il cui meridiano non superi qualche grado, così che i raggi arrivino alla lente sotto piccole incidenze e si scostino poco dall'asse cardinale; tali raggi sono detti *centrali*. Allora la lente è esente quasi da aberrazione sferica; accade cioè che un fascio di raggi paralleli all'asse cardinale, dopo la loro rifrazione s'incontrano tutti sensibilmente in un medesimo punto, detto *fuoco* della lente. E accade pure che i raggi emessi da un punto posto a distanza finita, o incrociantisi in esso, danno origine a un fascio di raggi emergenti che s'incrociano tutti sensibilmente in un altro punto, che è il *punto coniugato* del primo.

271. **Fuochi reali e virtuali.** — Prendiamo una lente biconvessa di piccolo spessore e di piccola

apertura; facciamo cadere su essa, nella direzione dell'asse cardinale, un fascio di raggi solari che possono ritenersi paralleli, e poi riceviamo il fascio emergente sopra uno schermo posto dall'altra parte. Vedremo disegnarsi su questo un circolo molto chiaro, ma allontanando o avvicinando lo schermo, finiremo per trovare una posizione dove la sezione del fascio conico emergente si riduce quasi a un punto, e la luce è vivissima. Questo punto F', nel quale convergono dopo la loro rifrazione i raggi paralleli all'asse cardinale, è il *secondo fuoco* della lente (fig. 289).

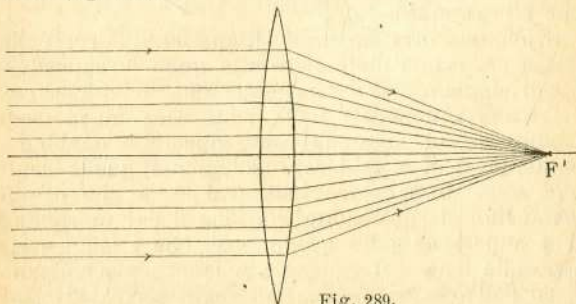


Fig. 289.

Il *primo fuoco* F si trova innanzi alla lente, ed è un punto tale che i raggi emessi da esso, o che si incrociano in esso, dopo la loro rifrazione nella lente formano un fascio di raggi paralleli all'asse; lo si determina sperimentalmente allo stesso modo, rovesciando la lente e facendo cadere la luce del sole sull'altra faccia. I due fuochi di una lente convergente sono entrambi reali, formati cioè dal reale concorso de' raggi luminosi. Le lenti divergenti, al contrario, non hanno fuochi reali: ripetendo difatti con una di esse l'esperienza ora detta, si vede che

il fascio che emerge è divergente; i raggi però prolungati si incontrano in un punto F' situato sull'asse dinanzi alla lente (fig. 290); esso è il secondo fuoco, ed è virtuale. L'occhio che riceve il fascio che esce dalla lente, prova la stessa sensazione che proverebbe se in F' esistesse realmente un punto luminoso. L'altro fuoco F è a destra, ad eguale distanza, e pur esso virtuale.

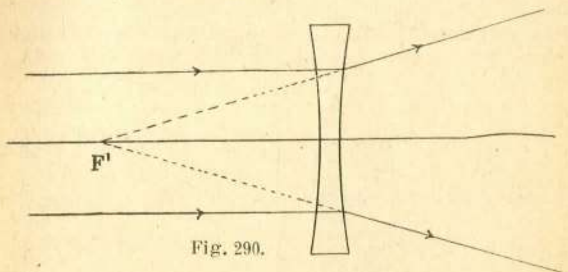


Fig. 290.

272. **Centro ottico.** — Oltre i fuochi, si può in una lente sottile considerare il centro ottico O, il quale gode della proprietà che ogni raggio diretto verso di esso esce dalla lente indeviato.

A tale uopo dai centri C e C' delle sfere conduciamo alle rispettive faccie della lente due raggi paralleli CM, $C'M'$ (fig. 291), e pei punti M ed M' due piani tangenti alle rispettive superficie: è chiaro che tali piani saranno essi pure paralleli. Un raggio IM che attraversando la lente passi per M', emergerà secondo $M'E$ parallelamente a IM (§ 266); per cui, se la lente è di piccolo spessore, si può ammettere che i due raggi paralleli IM e $M'E$ si confondano in un'unica direzione intermedia SOS'. Il punto O nel quale questo raggio incontra l'asse è appunto il centro ottico, e si vede che i raggi pas-

santi per esso proseguono il loro cammino senza esser deviati. Dalla similitudine poi de' triangoli COM, $C'OM'$ si ha che il centro ottico divide la CC' in due segmenti che stanno fra loro come i raggi delle sfere.

Pertanto, se le due faccie hanno la stessa curvatura, il centro ottico si trova sull'asse nel mezzo dello spessore della lente; se invece le due faccie

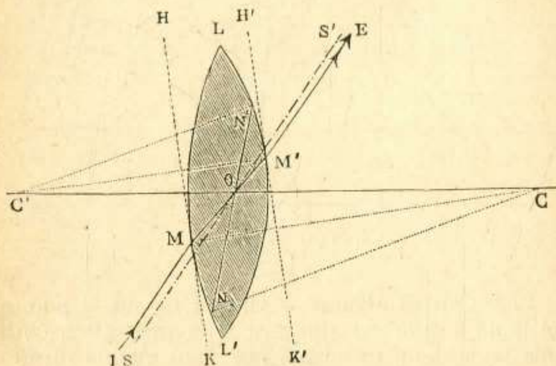


Fig. 291.

sono diversameute curve, il centro ottico non si trova ad eguale distanza dai vertici. Ciò che si è detto di una lente biconvessa, vale anche per una lente *biconcava*. Nelle lenti piano-convesse e piano-concave, il centro ottico si può ritenere sulla superficie curva; nei menischi convergenti e divergenti esso è all'esterno della lente, dalla parte della faccia convessa nel menisco convergente, e dalla parte della faccia concava nel menisco divergente.

Una lente infinitamente sottile — praticamente, molto sottile — riesce così determinata mediante

tre soli punti, detti *punti cardinali;* cioè il centro ottico O e i due fuochi F e F' equidistanti da O. Se questi tre punti si succedono nell'ordine F, O, F' la lente è convergente; se invece si succedono nell'ordine F', O, F la lente è divergente.

Se $A\,O$ è un raggio incidente emesso da un punto luminoso A e passante pel centro ottico O (fig. 292), il raggio d'emergenza corrispondente $O\,A'$ uscirà indeviato; e poichè tutti i raggi emessi da un punto si incrociano dopo la loro rifrazione in un altro punto che è il suo coniugato, così questo dovrà

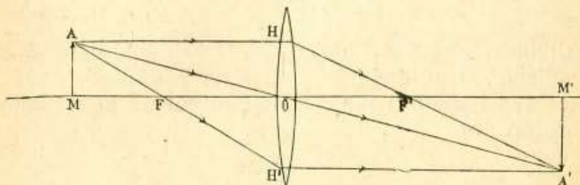


Fig. 292.

trovarsi sempre sopra la retta che passa pel punto luminoso e pel centro ottico: questa retta dicesi *asse secondario* corrispondente a quei due punti.

273. **Punti e piani coniugati; imagini reali e virtuali.** — Ciò posto, la fig. 292 mostra la costruzione per trovare il punto A' coniugato di un punto dato A. Si conduca il raggio $A\,H$ parallelo all'asse cardinale, esso si rifrangerà secondo $H\,F'$; tirando poi il raggio $A\,F\,H'$ che passa per il primo fuoco, esso emergerà secondo $H'\,A'$ parallelamente all'asse; il punto d'incontro A' de' due raggi emergenti $H\,F'$, $H'\,A'$ è il coniugato di A; oppure si può tirare l'asse secondario $A\,O$; questo interseca la $H\,F'$ e la $H'\,A'$ nel punto A' cercato. Conducendo

poi per A e A' due piani perpendicolari all'asse AM e $A'M'$, questi sono coniugati; vale a dire, a qualunque punto preso nel primo piano corrisponde come coniugato un punto del secondo, che si trova

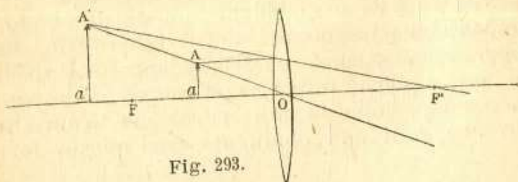


Fig. 293.

nell'intersezione di questo e del relativo asse secondario. Ora se AM è una retta luminosa, $A'M'$ è la sua imagine: nel caso della figura, essa è reale e capovolta.

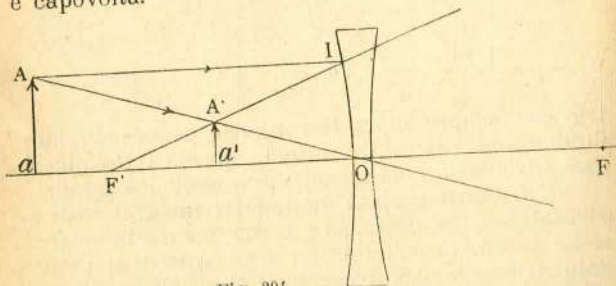


Fig. 294.

La fig. 293 mostra invece come si costruisca l'imagine virtuale $A'a'$, dell'oggetto Aa posto dinanzi alla lente ad una distanza minore della distanza focale; essa è diritta e più grande, e la si osserva ponendo l'occhio sulla via del fascio divergente di raggi che emergono dalla lente.

Le lenti convergenti quindi forniscono, come gli specchi concavi, imagini reali e virtuali; quelle, sempre rovescie, sono maggiori, eguali o minori dell'oggetto a seconda della distanza di questo, e possono proiettarsi su uno schermo; queste sempre diritte e maggiori dell'oggetto.

Le lenti divergenti, come mostra la fig. 294, forniscono soltanto, a somiglianza degli specchi convessi, imagini virtuali, diritte e sempre più piccole dell'oggetto. La costruzione geometrica si fa con le stesse regole.

Analogamente a quanto si è detto per gli specchi, possiamo anche nel caso delle lenti trovare le relazioni di posizione e di grandezza dell'oggetto e della sua imagine. Nella fig. 292, dalla similitudine de' triangoli $FH'O$, $AH'H$ si ha:

$$\frac{H'O}{H'H} = \frac{FO}{AH}.$$

E parimenti dalla similitudine de' triangoli $F'HO$, $A'HH'$ si ha:

$$\frac{HO}{HH'} = \frac{F'O}{A'H'}.$$

Indicando le distanze focali FO ed $F'O$ con f; le distanze AH e $A'H'$ con x e x'; le normali AM, $A'M'$ con y e y', si ottiene dalle due precedenti relazioni, sommando;

$$1 = \frac{f}{x} + \frac{f}{x'},$$

od anche:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x'}; \tag{1}$$

e dividendole membro a membro:

$$(2) \qquad \frac{y'}{y} = \frac{x'}{x};$$

cioè due dimensioni omologhe dell'imagine e dell'oggetto sono nella stessa ragione delle loro distanze dalla lente.

Dalla (1) e dalla (2) si ottiene poi facilmente:

$$\frac{y'}{y} = \frac{x'-f}{f} = \frac{f}{x-f}.$$

Il rapporto $\frac{y'}{y}$ è detto *ingrandimento lineare.* — Quanto al segno di x e di x' nelle precedenti formole, bisognerà notare che il segno di x è sempre positivo, perchè l'oggetto è supposto dinanzi alla lente; quello di x' sarà positivo se tale distanza si troverà dietro la lente (imagine reale), e va preso negativo se l'imagine si forma invece dinanzi la lente (imagine virtuale).

Per le lenti divergenti valgono le stesse relazioni dando ad f il segno negativo.

Se poi la posizione dell'oggetto si riferisce al 1° fuoco, e quella della imagine al 2° fuoco, indicandone con z e z' le rispettive distanze, dalla similitudine de' triangoli MAF, $FH'O$, e da quella dei triangoli $M'F'A'$ e HOF' si desumono subito le due relazioni

$$(3) \qquad zz' = f^2; \frac{y'}{y} = \frac{z'}{f} = \frac{f}{z}$$

che sono eguali a quelle trovate per gli specchi.

274. **Aberrazione di sfericità nelle lenti. — Lenti di piccola distanza focale.** — Si è detto che le precedenti proprietà non si verificano nelle lenti,

se non quando queste abbiano piccolissima apertura in confronto ai raggi di curvatura delle due superficie. Ciò si può vedere sperimentalmente con molta facilità: se ad una lente di apertura piuttosto grande noi sovrapponiamo un diaframma forato in modo da lasciare scoperta la parte centrale soltanto, questa ci darà su uno schermo, ad una certa distanza, una imagine nitida dell'oggetto che le è posto dinanzi. Se allora si ricopre la parte centrale con un dischetto opaco, e si lascia invece scoperta la parte periferica, l'imagine alla stessa distanza riuscirà sbiadita e sfumata nei contorni, perchè i raggi che emergono dai punti prossimi all'orlo della lente si incontrano in punti dell'asse più vicini alla lente stessa che non quelli centrali: e difatti avvicinando in questo caso lo schermo alla lente, l'imagine diventa più nitida. Ne segue che quando la lente è tutta scoperta, l'imagine può designarsi abbastanza netta sullo schermo, ma il contorno ne sarà incerto e sfumato.

Una lente che dà imagini dissimili dall'oggetto e sfumate al contorno, si dice affetta da *aberrazione di sfericità*. Da simile grave difetto vanno esenti quelle lenti, le quali hanno tutto al più l'apertura di 2 o 3 gradi, e che quindi presentano una superficie tanto minore quanto più sono curve le faccie. In caso diverso è necessario restringere l'apertura con diaframmi forati.

Una lente dicesi *aplanetica* se è scevra del difetto dell'aberrazione di sfericità, se cioè i raggi emessi da un punto luminoso concorrono dopo la loro rifrazione, realmente o con il loro prolungamento, tutti in uno stesso punto. Le lenti sferiche non sono mai perfettamente tali. Il calcolo poi insegna che l'aberrazione si può attenuare, dando alle lenti acconcie curvature. Così, a pari apertura

e ampiezza focale, l'aberrazione risulta minore in una lente biconvessa di cui un raggio sia sestuplo dell'altro, sempre che l'oggetto di cui si vuole l'imagine sia molto lontano o molto vicino al fuoco: nel primo caso gli si volge la faccia più curva, nel secondo quella meno curva. Quasi come queste valgono le lenti piano-convesse.

L'aberrazione di sfericità si evita più difficilmente nelle lenti di corto fuoco. Per avere delle lenti la cui distanza focale sia molto piccola, è necessario far molto piccoli i raggi di curvatura delle faccie; onde, a eliminare l'aberrazione di sfericità, bisognerebbe lasciare scoperta una piccolissima calotta delle superficie rifrangenti: in questo modo però diverrebbe troppo piccola la quantità di luce che si rifrange nella lente, e le imagini sarebbero poco luminose. A tale inconveniente si ovvia adoperando, invece di un'unica lente a corto fuoco, un sistema di lenti disposte le une di seguito alle altre, centrate sul medesimo asse, ciascuna di una distanza focale non troppo piccola. Questo sistema agisce come una lente unica di distanza focale minore di quella delle lenti componenti, e così è raggiunto lo scopo di avere un sistema diottrico di breve distanza focale, senza la necessità di dover limitare di troppo l'apertura, e conseguentemente diminuire la quantità di luce che concorre a formare l'imagine.

275. **Aberrazione cromatica delle lenti.** — Oltre l'aberrazione di sfericità di cui ora si è tenuta parola, le lenti vanno soggette all'*aberrazione cromatica,* che consiste in una iridescenza dei contorni dell'imagine da esse fornite. Ciò dipende dalla diversa rifrangibilità de' raggi di vario colore che compongono la luce bianca, per cui le loro distanze focali risultano diverse: i raggi violetti formano il

loro fuoco più presso alla lente, quelli rossi più lontano, e le altre luci hanno il loro fuoco intermedio fra questi.

Si vede pertanto che la lente oltre alla rifrazione esercita una certa dispersione della luce composta, la quale si misura dalla differenza fra la distanza focale dei raggi rossi e quella dei raggi violetti. Questa differenza risulta diversa per le diverse qualità dei vetri; per esempio, per il vetro comune (crown) è appena $^1/_{40}$ della distanza focale media, mentre è $^1/_{20}$ per il vetro pesante (flint).

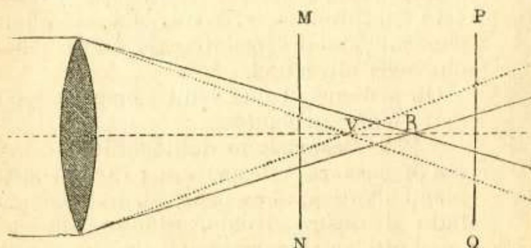


Fig. 295.

Se dunque una lente convergente è investita da un fascio di raggi paralleli (fig. 295), il fuoco violetto si formerà in *V* e quello de' raggi rossi più lontano in *R*. Uno schermo come *MN* posto fra la lente e i fuochi, riceve nel mezzo tutti i raggi, i quali sovrapponendosi ricostituiscono la luce bianca, ma il contorno appare tinto da una sfumatura che dal giallo finisce verso l'esterno nel rosso. Collocando invece il foglio in *PQ*, al di là dei fuochi, il contorno avrà una sfumatura colorata che degrada dall'azzurro verso il violetto. La stessa cosa succede con lenti divergenti.

È facile poi vedere, costruendo le imagini colorate rispetto ai diversi fuochi, come esse, non ricoprendosi esattamente nel contorno, debbano risultare colorate.

Ad ovviare a questo inconveniente, si accoppia una lente divergente di flint con una convergente di crown (fig. 296), facendole combaciare esattamente: così, dati i due vetri, si calcolano i tre raggi di curvatura in modo che il sistema abbia la voluta distanza focale, presenti una piccola aberrazione di sfericità, e coincidano i fuochi di due colori diversi, che per lo più sono il rosso vivo e il turchino verdastro; accade allora che coincidono sensibilmente anche i fuochi delle altre luci.



Fig. 296.

Un sistema di due lenti come questo è detto *lente acromatica.*

276. **Descrizione dell'occhio.** — Prima di passare a descrivere i diversi strumenti d'ottica, sarà bene di dire come è fatto il nostro occhio. Ridotto alle sue parti otticamente essenziali, l'occhio consta di un globo la cui superficie è sostenuta contro la pressione esterna da liquidi di diversa densità, che lo riempiono completamente. Lo strato superficiale più grosso è formato da una membrana resistente e opaca S detta *sclerotica* (fig. 297).

Questa sul davanti è aperta e sostituita da un'altra membrana trasparente KK, detta la *cornea,* avente un raggio di curvatura minore di quello della sclerotica. Nell'interno la sclerotica è tappezzata da una membrana vascolare o *coroide,* la quale è ricoperta da un pigmento simile a quello della pelle dei neri.

Presso la linea di unione fra la sclerotica e la cornea trasparente, la coroide forma un gran nu-

mero di ripiegature *HH*, disposte in corona circolare, che si chiamano *processi ciliari*.

Sopra la coroide si stende la *retina*, che è una espansione del nervo ottico. La superficie di questo tessuto nervoso è formata da un gran numero di *bastoncini* e di *conetti*, i quali ultimi poi non sono ugualmente sparsi, ma sono numerosissimi entro e nei pressi di una macchietta gialliccia *M*, che si trova in vicinanza dell'asse medio dei centri di cur-

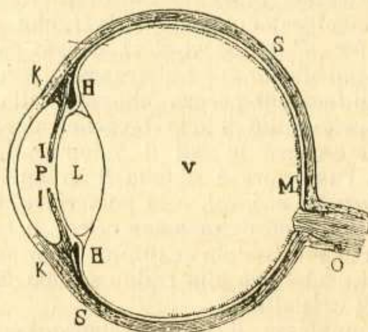


Fig. 297.

vatura delle superficie rifrangenti dell'occhio. Questa macchietta, pel suo colore, dicesi *macula lutea*, e il suo centro, alquanto depresso, è detto *fovea centralis*. Essa è la regione della maggior sensibilità, la quale decresce poi gradatamente nei punti più lontani della macula lutea col diradarsi dei conetti, e scomparisce del tutto in prossimità dei processi ciliari, dove la retina si trasforma in una membrana priva del tutto di estremità nervose.

L'interno del bulbo è diviso in due camere completamente distinte dal *cristallino* o *lente cristallina*

L. È questo un corpo di forma lenticolare, a superficie convesse, con un raggio di curvatura minore per la faccia posteriore che per l'anteriore. È formato di materia perfettamente trasparente, la cui densità e il cui potere rifrangente vanno crescendo verso l'interno.

Il cristallino è contenuto in una sottile membrana trasparentissima detta *capsula del cristallino*, per mezzo della quale esso aderisce alla corona circolare dei processi ciliari. Davanti al cristallino si trova una membrana opaca, l'*iride II*, che porta nel mezzo un foro *P* detto *pupilla;* questa per mezzo di due sistemi di fibre può allargarsi o restringersi, e serve istintivamente, senza influenza della volontà, a regolare la quantità di luce che penetra nell'occhio.

Delle due camere in cui il bulbo è diviso dal cristallino, l'anteriore è ripiena di un liquido simile all'acqua *(umore acqueo)*, e la posteriore *V* di una sostanza semifluida detta *umor vitreo*, e contenuta in una borsa sottilissima costituita dalla *membrana ialoidea*, che aderisce alla retina ed alla faccia posteriore del cristallino.

Questo complesso di mezzi trasparenti costituisce un sistema diottrico convergente, che ci dà degli oggetti esterni imagini reali e rovescie.

Perchè la visione sia distinta, l'imagine deve dipingersi sulla retina; e perchè la sensazione sia la più netta possibile, essa deve formarsi sulla macula lutea. Se l'oggetto che si fissa è un punto, si dirige, l'occhio in modo che la sua imagine venga a formarsi proprio nella fovea centralis.

La retina nel punto d'inserzione del nervo ottico nell'occhio, si mostra insensibile: questo punto dicesi *punto cieco*, ovvero anche *punto di Mariotte*.

Per mettere in evidenza la cosa, basta segnare su un foglio bianco due punti neri come *A* e *B*

(fig. 298), ad una conveniente distanza: poi tenendo chiuso l'occhio sinistro, si fissi col destro il punto *A;* sarà in generale percepito anche il punto *B*. Ma, allontanando gradatamente l'occhio dal foglio, ci sarà una posizione per la quale l'imagine di *B* viene a formarsi nel punto cieco, e allora *B* scompare. Se poi si seguita ad allontanare ancora l'occhio, sempre fissando il punto *A*, il punto *B* apparirà di nuovo.

Vogliamo anche dire che la retina non è incolora, come si credeva sino a vari anni fa, ma di un bel rosso dovuto ad una sostanza speciale detta *eritropsina* o *porpora retinea,* il quale si scolora sotto l'azione della luce, nè si mantiene all'oscuro oltre le 24 ore dalla morte. Nelle retine di animali tenuti

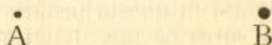


Fig. 298.

prima nell'oscurità, poi esposti per poco alla luce e subito uccisi, si poterono osservare le imagini degli oggetti visti ultimamente.

277. **Accomodamento dell'occhio: occhio normale; difetti dell'occhio.** — La curvatura delle superficie del cristallino, che è il più rifrangente dei mezzi che compongono l'occhio, può volontariamente modificarsi per mezzo dei processi ciliari. Da ciò risulta uno spostamento tale dei punti cardinali, che possono cadere sulla retina le imagini di punti posti a distanze tanto minori quanto maggiore è la curvatura delle faccie del cristallino.

Questa proprietà dell'occhio di modificarsi a seconda delle diverse distanze degli oggetti guardati, dicesi *accomodamento;* tale facoltà non è però illimitata. Se si imagina che il punto di incontro delle

rette di incidenza (punto luminoso) si muova lungo l'asse dell'occhio, si trova che il suo punto coniugato non può farsi cadere sulla retina, se non quando il punto obbiettivo percorre un certo segmento, la cui lunghezza misura l'ampiezza dell'accomodamento.

L'estremità più vicina all'occhio dicesi *punto prossimo*, e ad esso corrisponde il massimo sforzo di accomodamento; l'estremità più lontana si chiama *punto remoto*, e per essa non si fa alcuno sforzo, ossia l'occhio si trova nella posizione di riposo.

Il punto remoto si considera normalmente posto quando è all'infinito: si considera cioè normale un occhio che può far concorrere nello stesso punto della retina dei raggi incidenti paralleli, ossia un occhio il cui secondo fuoco, nella posizione di riposo, è sulla retina.

Un occhio dotato di questa proprietà dicesi *emmetropico;* ogni altro occhio, il cui punto remoto sia a distanza finita, dicesi *ametropico.*

Il punto remoto può essere a distanza finita avanti o dietro l'occhio: nel primo caso l'occhio è *brachimetropico* o *miope,* nel secondo *ipermetropico.*

Un occhio brachimetropico riceve sulla retina, senza sforzo d'accomodamento, l'imagine di punti e oggetti posti a una distanza finita determinata, e talora molto piccola; e siccome l'accomodamento può soltanto avvicinare all'occhio il punto il cui coniugato è sulla retina, e non allontanarlo, così un tale occhio non può avere la visione distinta al di là di quella distanza determinata, se non ricorrendo all'uso di appositi strumenti.

Un occhio ipermetropico invece vedrebbe distintamente, senza bisogno di accomodamento, solo quando ricevesse un fascio di raggi convergenti in un punto posto dietro la retina: è necessario quindi che fra il punto luminoso e l'occhio sia frapposta

una lente convergente atta a rendere convergenti i raggi partiti da quel punto. Senza accomodamento esso non può vedere oggetti reali, ma soltanto immagini che, se l'occhio non intercettasse la luce, andrebbero a formarsi al di là dell'occhio stesso. Il secondo fuoco di un occhio ipermetropico, nella condizione di riposo, si trova dietro la retina.

Il punto prossimo dell'occhio emmetropico è alla distanza di 25 cm. circa; nell'occhio brachimetropico è ordinariamente più vicino; nell'ipermetropico più lontano.

In un medesimo individuo poi coll'età diminuisce l'ampiezza d'accomodamento; il cingolo dei processi ciliari si allenta, il cristallino si irrigidisce diventando sempre meno atto alla visione di oggetti vicini; il punto prossimo si allontana. Si dice allora che l'occhio diventa *presbite.*

In alcuni occhi le varie superficie rifrangenti, e particolarmente quella della cornea, si discostano in modo sensibile dalla forma sferica; occhi siffatti presentano il difetto dell'*astigmatismo*, per cui non si riesce a vedere con pari nettezza un sistema di rette che s'incrociano in un punto. Tale difetto non può correggersi con lenti sferiche, bensì con lenti che abbiano ne' diversi meridiani differenze di curvatura eguali e di segno contrario a quelle dell'occhio.

278. **Occhiali.** — Si è detto che nell'occhio presbite, per diminuita facoltà di accomodamento, il punto prossimo si trova ad una distanza maggiore di 25 cm. che è quella della vista normale, e alla quale torna comodo tenere gli oggetti per vederli distintamente.

Per correggere un tale occhio deve dunque adoperarsi una lente convergente, la quale di un oggetto A posto alla distanza di circa 25 cm., glie ne

fornisca una imagine virtuale A' nel suo punto prossimo (fig. 299).

Per correggere un occhio miope si richiederà invece una lente divergente: i raggi emessi da un punto A (figura 300) acquisteranno un andamento come se provenissero da un punto A' più vicino, e compreso ne' limiti di accomodamento. La distanza focale di questa lente deve essere eguale alla distanza del punto remoto: allora un fascio incidente parallelo uscirà dalla lente ed entrerà nell'occhio

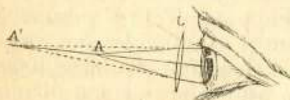


Fig. 299.

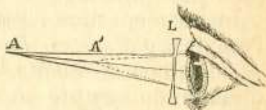


Fig. 300.

come se provenisse da questo punto, e l'occhio miope così armato si troverà nelle stesse condizioni dell'occhio normale.

279. **Angolo visuale o grandezza apparente.** — Nel cristallino dell'occhio, sull'asse cardinale, esiste un punto detto *centro* o *punto d'incrociamento dei raggi,* il quale gode della proprietà che i raggi incidenti diretti verso di esso proseguono nella stessa direzione.

Questo punto nell'occhio normale dista di 15^{mm} circa dalla retina, e di 7^{mm} dalla cornea. Ciò posto, la costruzione del punto coniugato di un punto qualunque L si riduce a congiungere L col centro C dell'occhio (fig. 301), e prolungare questa retta fino ad incontrare la retina in M: l'imagine e l'oggetto sono dunque omotetici rispetto a C.

Quando si fissa un punto, la retta LC prolungata interseca la retina nella fovea centralis; si gira l'occhio finchè questo avvenga. La retta che con-

giunge il punto C con la fovea centralis è detta *retta visuale;* essa non coincide propriamente con l'asse cardinale, essendo la fovea alquanto spostata verso la tempia rispetto al secondo fuoco.

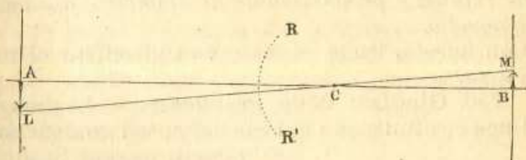


Fig. 301.

Nella fig. 301 considerando i due triangoli simili ALC, BMC, si ha:

$$\frac{LA}{MB}=\frac{AC}{CB} \tag{1}$$

da cui:

$$MB=\frac{LA}{AC}\,.\,CB. \tag{2}$$

Questa è la grandezza dell'imagine retinea; e si vede che tale grandezza sta a quella dell'oggetto, come la distanza del centro dell'occhio dalla retina sta alla distanza dell'oggetto dal detto centro.

Se l'oggetto è un semplice segmento di retta perpendicolare all'asse, o se di un oggetto si considera soltanto una dimensione, la grandezza dell'imagine sulla retina dipende solamente dall'angolo formato in C dalle due rette visuali condotte alle sue estremità. Questo angolo si dice *angolo visuale* o anche *grandezza apparente* o *diametro apparente* dell'oggetto. Ma trattandosi di oggetti abbastanza piccoli o lontani, all'angolo si può senza errore sensibile sostituire la tangente; cosicchè *la grandezza o diametro apparente di un oggetto è data dal rapporto*

della sua grandezza vera LA alla distanza AC dal centro dell'occhio; e notando che la distanza *CB* di esso centro dalla retina è costante per un dato occhio, si scorge dalla (2) che la *grandezza dell'imagine retinea è proporzionale al diametro apparente dell'oggetto.*

Con questa legge si spiegano gli effetti di prospettiva.

280. **Giudizio delle grandezze.** — Le imagini retinee costituiscono la base dei nostri giudizii sugli oggetti esterni. Si giudica della loro grandezza dalla detta imagine; ora le dimensioni di questa dipendono unicamente, come si è detto, dall'angolo compreso dalle due rette visuali che si incrociano in *C*, e sono condotte alle estremità delle dimensioni omologhe dell'oggetto. Se questo è posto obliquamente all'asse, l'angolo visuale è evidentemente più piccolo di quello che si avrebbe se l'oggetto fosse situato normalmente all'asse. — Quando la distanza è conosciuta, il giudizio della grandezza si fa istintivamente; ma se la distanza non è conosciuta, e deve essere arguita dal grado maggiore o minore della convergenza degli assi dei due occhi, dallo sforzo d'accomodamento necessario, e dalla nitidezza dei contorni, la quale varia colla prospettiva aerea, rimaniamo perplessi, e il nostro giudizio può riuscire erroneo.

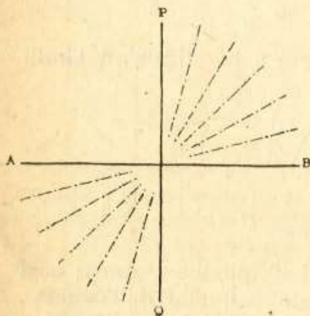


Fig. 302.

Il giudizio della reale dimensione degli oggetti osservati dipende in generale da un atto psichico molto complesso, come lo provano le frequenti *illusioni* dalle quali l'occhio può essere tratto in inganno.

In generale stimiamo più lunghe le linee verticali delle orizzontali; gli angoli pieni sembrano maggiori di quelli vuoti, e così accade che nella fig. 302 la retta PQ perpendicolare alla AB sembra obliqua.

I due settori A e B (figura 303) non sembrano uguali, come invece sono realmente.

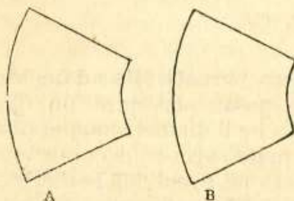


Fig. 303.

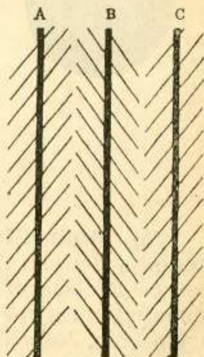


Fig. 304.

Le rette A, B parallele sembrano convergere verso il basso, mentre quelle B, C sembrano convergere verso l'alto (fig. 304).

Segnaliamo anche il fenomeno della *irradiazione*, per cui le aree fortemente illuminate compariscono più estese delle oscure: un circolo bianco su fondo nero appare maggiore di un circolo uguale nero su fondo bianco (fig. 305).

La irradiazione si spiega colla imperfezione dell'accomodamento e coll'aberrazione di sfericità del-

l'occhio, per cui a un punto luminoso corrisponde sulla retina un piccolo circolo, il *circolo di diffusione.*

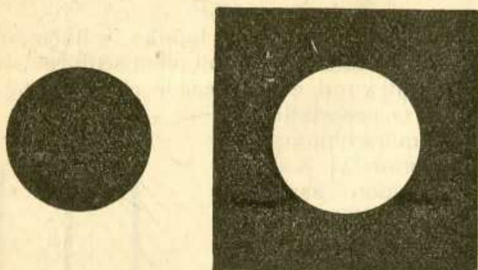


Fig. 305.

281. **Minima lunghezza percettibile ad occhio nudo.** — Perchè l'occhio possa percepire un oggetto, è necessario inoltre che il diametro apparente abbia un certo valore, il quale varia colle condizioni dell'occhio, colla illuminazione, e col colore dell'oggetto guardato e del fondo sul quale esso spicca.

Un occhio normale, colla luce diurna diffusa, distingue ancora un oggetto sotto il diametro apparente di circa 1'. In condizioni eccezionali, quando l'oggetto è bianco sopra fondo oscuro ed è fortemente illuminato, basta un diametro apparente di soli 30''.

Al contrario, una linea nera sopra un campo chiaro, per essere vista deve sottendere un angolo visuale di almeno 2'.

Nelle migliori circostanze si sono arrivati a distinguere due punti le cui imagini erano discoste di $0^{mm},0043$, a cui (come si deduce dalla (2) del pa-

ragrafo precedente) corrisponde un angolo visuale di 1′; tale distanza corrisponde press'a poco alla grandezza del diametro dei conetti sulla macula lutea, il che sta a confermare che questi sono gli ultimi elementi sensitivi della retina.

282. **Giudizio delle distanze.** — Nè meno fallace può riuscire il giudizio delle distanze, quando guardiamo con un solo occhio. In questo caso, se la reale dimensione dell'oggetto ci è conosciuta, dal suo diametro apparente possiamo dedurre con una certa sicurezza la distanza a cui esso è posto. Ma quando la reale dimensione ci è sconosciuta, l'apprezzamento della distanza è impossibile. Per gli oggetti che sono alla superficie della terra, il giudizio della distanza con un solo occhio si fa per un processo assai laborioso: siamo, per esempio, guidati dal vedere che alcuni oggetti ne ricoprono degli altri, dal discernere più o meno certi particolari, dalla posizione delle ombre proiettate, dall'osservare che l'oggetto va a ricoprire il fondo in punti più o meno discosti, quando l'occhio si sposta, ecc.

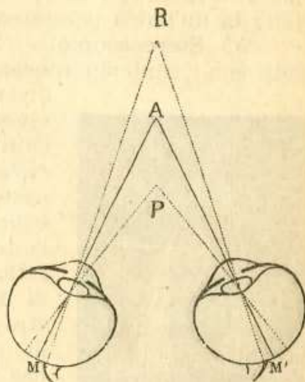


Fig. 306.

Ma la sensazione reale della profondità la proviamo osservando coi due occhi contemporaneamente. Nel fissare un punto *A* (fig. 306), facciamo convergere le rette visuali dei due occhi in modo

che le due imagini si formino sulle fovee M e M'. Quel punto lo vediamo scempio, mentre vediamo doppi tutti gli altri come P e R più vicini o più lontani. Ce ne possiamo convincere facilmente, fissando un dito tenuto davanti agli occhi, e guardando contemporaneamente un oggetto più lontano. Come i centri delle due fovee, si corrispondono a due a due i punti delle due retine, e le imagini che si formano su *due punti corrispondenti* si fondono in un'unica percezione.

283. **Stereoscopio.** — Ma coi due occhi gli oggetti sono contemporaneamente visti sotto aspetti diversi, come è facile convincersi guardando un libro sottile tenuto ritto di costa davanti a noi: se coll'occhio destro si vede il frontispizio, coll'occhio sinistro si vede l'ultima pagina. L'imagine retinea di destra non è quindi uguale a quella di sinistra; ed è appunto la fusione di queste imagini differenti che desta la *percezione del rilievo*, che ci fa *veder solido*. Siffatta percezione si produce artificialmente, presentando a ciascun occhio il disegno prospettico che gli conviene. Allora, facendo convergere gli assi oculari in modo da sovrapporre le due imagini, si ha il senso del rilievo.

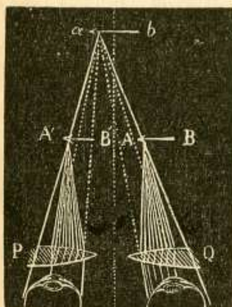


Fig. 307.

Per aiutare i due occhi a sovrapporre le due imagini, si adopera l'istrumento detto *stereoscopio* (fig. 307), nel quale i raggi che provengono dalle due vedute, sono deviati e condotti a sovrapporsi da due mezze lenti convergenti poste davanti agli occhi.

284. **Telestereoscopi.** — Quando l'oggetto è lontano, le imagini delle due retine sono pochissimo diverse, e l'oggetto perde il rilievo: così, per esempio, succede di un paesaggio visto da lontano. Per accrescere il rilievo furono ideati i *telestereoscopi*, che hanno per fine di offrire agli occhi la visione di un oggetto da due punti di vista piu lontani fra loro della distanza degli occhi stessi.

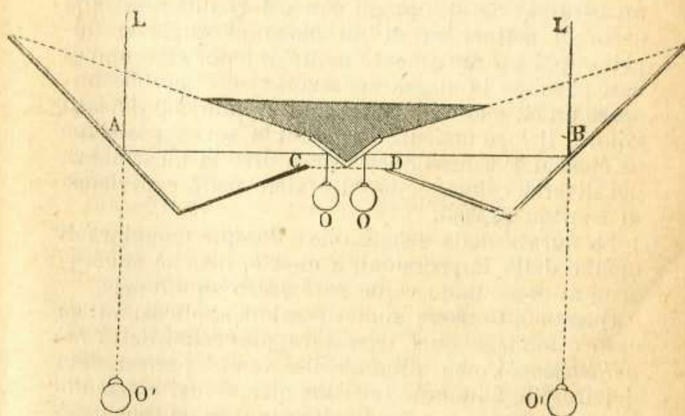


Fig. 308.

La fig. 308 fa vedere come sono combinate le cose: *A* e *B* sono due specchi piani, o meglio le faccie di due prismi a riflessione totale; essi rinviano i raggi *L L* che ricevono da lontano a due altri specchi piani *C*, *D*, i quali riflettono la luce verso gli occhi *O*, *O*. Questi dunque ricevono l'impressione come se si trovassero ne' punti più lontani *O'*, *O'*.

285. **Persistenza delle imagini sulla retina.** — Finiremo questo breve trattato della visione, con un richiamo al fenomeno, cui abbiamo accennato, della persistenza delle immagini sulla retina: l'azione della luce può essere brevissima, ma l'impressione che essa produce sulla retina dura per una frazione di secondo. Questo fatto capitale risulta da osservazioni di ogni giorno: il tizzoncello acceso che descrive un circolo di fuoco nell'oscurità, ne è un esempio. Se si dipinge con colori differenti una serie di settori su di un disco al quale si imprime poi un movimento molto rapido, ciascuno di essi produce la stessa sensazione che farebbe nascere un circolo uniformemente dipinto collo stesso colore; il loro insieme dà quindi la sovrapposizione di ciascuna sensazione, vale a dire la mescolanza dei diversi colori, come si è visto nella esperienza di Newton (§ 266).

La durata della sensazione è dunque maggiore di quella delle impressioni, e queste, benchè successive, si combinano come se fossero simultanee.

Questo fatto trova numerosissime applicazioni: su esso è fondato quel curioso apparecchio detto *fenakistiscopio,* che ultimamente venne perfezionato dai fratelli Lumière con l'invenzione del *cinematografo.* Questo, come è noto, riproduce su uno schermo con sorprendente fedeltà movimenti e scene animate: in grazia della immensa rapidità dell'odierna fotografia ne furono fotografate le diverse fasi, nella ragione di quindici o venti al secondo, su di un nastro di celluloide sensibilizzato, fatto scorrere rapidamente dinanzi all'obbiettivo della macchina fotografica, il quale si scopre e si chiude altrettante volte. Sviluppate poi e fissate le impressioni fotografiche (su uno stesso nastro di celluloide ne possono essere di seguito parecchie migliaia), si fanno ripas-

sare con la stessa velocità dinanzi agli occhi degli osservatori, proiettandole ingrandite su uno schermo; si ottiene così la fedele riproduzione dei movimenti.

Un'altra applicazione consiste a osservare la forma delle goccie in una vena liquida attraverso ai fori praticati verso il contorno di un disco che ruota con velocità costante. A ciascun foro del disco rotante che passa dinanzi all'occhio, vediamo le goccie nel posto che esse occupano in quell'istante; e se il periodo del passaggio dei fori dinanzi all'occhio e delle goccie al medesimo punto della vena è lo stesso, queste sembreranno immobili e se ne potrà studiare la forma; il metodo è detto *stroboscopico.*

286. **Teoria delle sensazioni de' colori. Daltonismo.** — Completeremo queste nozioni dell'occhio e della visione con alcuni cenni intorno alle *sensazioni dei colori.* Secondo la teoria generalmente ammessa e formulata da Helmholtz e da Krebs, nell'occhio non trovano riscontro i numerosi organi che nell'orecchio servono alla sensazione dei suoni semplici, ma in ogni conetto della retina concorrerebbero solo tre diverse specie di nervi. Questi nervi però vengono eccitati da una luce omogenea in diversa misura, cioè: la 1ª specie è massimamente sensibile alla luce rossa; la 2ª alla luce verde; la 3ª alla luce violetta. Le tre curve della figura 309, nelle quali i punti delle ascisse corrispondono alle diverse regioni dello spettro, stanno a rappresentare con le loro ordinate le varie eccitabilità: l'area racchiusa da ciascuna curva e dalla retta orizzontale esprime pertanto l'eccitazione complessiva di tutti i raggi dello spettro sulle rispettive specie di nervi.

La sensazione del bianco risulta da eguali eccitazioni delle diverse specie di nervi; e poichè vi

sono coppie di colori semplici che sovrapposti formano il bianco, come, per esempio, l'aranciato e l'azzurro, le ordinate di questi due colori devono soddisfare alla relazione:

$$AB + CD = GH + EF = KL + MN.$$

Ne risulta che si può destare la sensazione del bianco in tanti modi, scegliendo opportunamente due radiazioni e combinandole insieme. Due colori

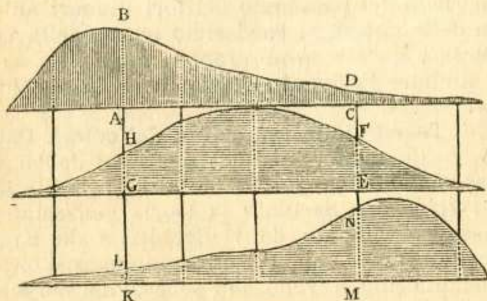


Fig. 309.

semplici o composti che danno la sensazione della luce bianca, si dicono *complementari*. È facile verificare se due colori sono complementari approfittando della persistenza delle imagini sulla retina (§ 285); si faccia rotare rapidamente un disco di cui i settori siano alternativamente dipinti con l'uno e l'altro colore; se risulta la sensazione del bianco, i due colori sono complementari.

Il nero è dovuto al riposo, ed il grigio ad eccitazioni deboli ed uguali. — Il processo della visione poi è molto diverso, secondo che l'eccitazione è dovuta a luce intensa o debole: sembra che la

visione colorata con luce intensa sia dovuta unicamente ai coni, mentre la visione incolora con luce debolissima pare dovuta ai bastoncini, in grazia della porpora (§ 277) che vi si forma e vi si accumula nell'oscurità. I bastoncini diventano perciò più sensibili con una prolungata permanenza nel buio, proprietà questa che costituisce l'*adattamento all'oscurità*. In armonia con quanto ora si è detto, nelle condizioni ordinarie di luce abbastanza intensa, noi giriamo istintivamente l'occhio in modo che le imagini degli oggetti esterni si formino sulla fovea centralis, dove i coni sono numerosi; al buio invece, un piccolo oggetto che mandi luce debolissima si rende visibile soltanto se la sua imagine cade fuori della macula lutea, e scompare quando tentiamo di fissarlo.

Alcuni fenomeni subiettivi si spiegano ammettendo la stanchezza de' nervi eccitati: così, al primo entrare da una via soleggiata in una stanza semibuia, mal si discernono gli oggetti; ma poi, al riaversi de' nervi, li distinguiamo benissimo anche coi loro colori.

Se si fissa un corpo molto splendente, e poi si chiudono gli occhi o si guarda verso il cielo, se ne vede spiccare l'imagine. Queste *imagini abbaglianti* cambiano di colore a seconda della diversa durata della stanchezza dei nervi della retina.

Se si guarda il disco rosso del sole verso il tramonto, si stancano specialmente i nervi della prima specie; volgendo subito dopo lo sguardo ad una parete bianca, vedremo spiccare una imagine complementare del sole in verdognolo; al contrario, un oggetto di color verde produrrebbe una imagine rossa. Sono queste le *imagini consecutive*.

Un colore spicca di più per *effetto di contrasto* quando gli è vicino il suo complementare. La spie-

gazione è la stessa: fissando, per esempio, un oggetto rosso, i nervi corrispondenti si stancano, mentre quelli del verde si riposano e conservano la freschezza per l'eccitamento; quando poi l'occhio, che è sempre mobilissimo, si rivolge al verde, ne riceve una impressione più viva.

Ma su questi effetti di contrasto hanno influenza anche altre circostanze: se, per esempio, si illumina un foglio di carta bianca contemporaneamente con la luce del giorno e di una candela, l'ombra di un'asticella proiettata dalla prima sorgente parrà gialla come realmente è, ma quella proiettata dalla candela appare turchina, mentre in realtà è bianca questo dipende da ciò che erroneamente giudichiamo bianca la carta così illuminata.

Un difetto grave di alcuni occhi, detto *acromatopsia* o *daltonismo*, è quello di non distinguer bene i colori. Gl'individui che ne sono fortemente affetti non vedono nello spettro che due colori, che essi chiamano generalmente giallo e turchino: al giallo riferiscono tutto il rosso, l'aranciato, il giallo e il verde; dicono grigio il turchino-verdastro, e turchino tutto il resto. Fra i colori dei corpi essi confondono il rosso col verde, il giallo d'oro con il giallo, il rosa con il bleu. Tale grave difetto pare dovuto a una parziale cecità della retina, congenita od anche prodotta da qualche malattia, consistente per lo più nella paralisi di quei nervi destinati, secondo l'Helmholtz, alla impressione dei raggi rossi; invece si conserverebbe integra la funzione delle due altre specie di nervi destinati ad essere rispettivamente eccitati dai raggi verdi e dai raggi violetti.

287. **Strumenti ottici.** — Diconsi *strumenti ottici* certe combinazioni di lenti e di specchi, che degli oggetti danno imagini in condizioni più favorevoli degli oggetti stessi per la osservazione.

Le lenti o i sistemi di lenti che fanno parte degli strumenti ottici, si distinguono in *obiettivi* e *oculari*. Gli obiettivi sono sempre convergenti, e forniscono imagini reali degli oggetti che si vogliono osservare; gli oculari invece danno imagini virtuali, sia degli oggetti, sia delle imagini fornite dagli obiettivi.

Gli strumenti ottici si dividono in *semplici* e *composti:* sono semplici quelli formati da una lente o da un sistema di lenti, il cui ufficio però può essere prestato da una lente sola; sono composti gli altri formati da due sistemi di lenti, l'obiettivo e l'oculare.

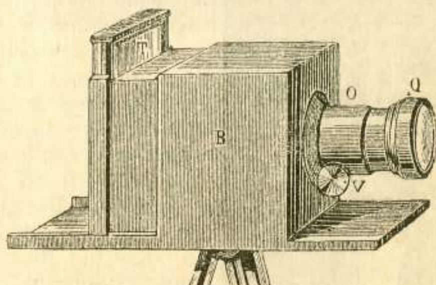


Fig. 310.

288. **Strumenti d'ottica semplici.** — *La camera oscura fotografica* è un apparato (fig. 310) costituito da una cassetta *B*, sull'apertura anteriore della quale è montato in un tubo metallico un obiettivo *O;* l'imagine reale, capovolta, degli oggetti esterni si può far cadere esattamente su uno schermo pellucido *T* che costituisce il fondo della cassetta, sia spostando questo, sia spostando il sistema diottrico con la vite *V*. Il fotografo sostituisce poi allo schermo pellucido una lastra sensibile alla luce, e ottiene la fotografia degli oggetti esterni.

Gli apparecchi di proiezione servono per mostrare a molte persone adunate, vedute fotografiche, dipinture sul vetro, fenomeni che avvengono in piccola scala, come per esempio le dilatazioni termometriche. Nella *lanterna magica*, nello *sciopticon* si adopera per lo più la fiamma del petrolio: nell'*apparecchio di proiezione fotoelettrico,* si ricorre alla luce elettrica, come si vede nella lanterna della fig. 311, la quale deve avere una edicola di sufficiente capacità per evitare i dannosi effetti del calore, e un sistema di aperture pel giuoco dell'aria. L'arco voltaico si colloca nel centro dello specchio sferico *A*, e nel fuoco della lente collettrice *C*, dalla quale emergerà così un fascio di raggi paralleli che serviranno all'illuminazione dell'oggetto. Un buon obiettivo ne dà poi un'imagine reale ingrandita, che si proietta su uno schermo bianco.

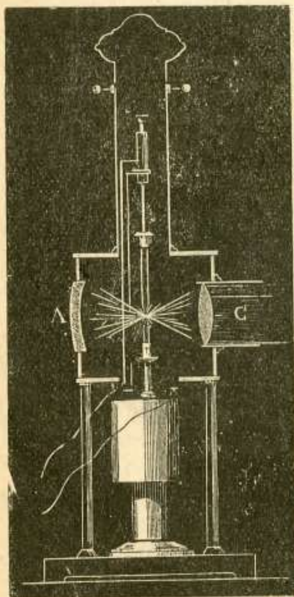


Fig. 311.

Un altro apparecchio di proiezione è il *microscopio solare* (fig. 312): consiste in un obiettivo di corto fuoco, formato con parecchie piccole lenti acromatiche; dinanzi ad esso si colloca l'oggetto di cui si vuol proiettare su uno schermo la imagine

reale e molto ingrandita; a tal fine bisogna che l'oggetto messo a rovescio dinanzi al fuoco dell'obiettivo sia molto vicino a questo.

L'oggetto d'ordinario è posto fra due vetrini ed è sostenuto da un apparecchio molto semplice *MN*;

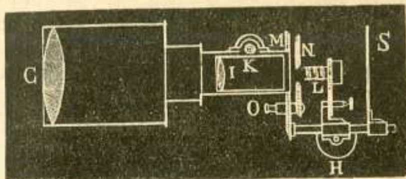


Fig. 312.

per regolare le distanze, allo scopo di ottenere una imagine nitida sullo schermo, si sposta l'obiettivo con una vite micrometrica *H*. Bisogna poi che l'oggetto sia fortemente illuminato, perchè dovendosi la luce ripartire su una superficie tanto più estesa,

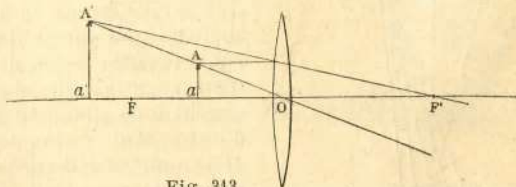


Fig. 313.

l'imagine altrimenti riescirebbe poco chiara. A tal fine serve la lente collettrice *C* che ricevendo direttamente i raggi del porta-luce, li fa convergere verso una seconda lente *I*; questa a sua volta li concentra sull'oggetto, e per regolarne la illuminazione si sposta la lente *I* col mezzo del rocchetto *K*.

Il *microscopio semplice* consiste in una lente o in un sistema di lenti, che di un oggetto di piccole dimensioni deve fornire un'imagine virtuale e ingrandita, cosicchè l'occhio la scorga a quella distanza per cui è accomodato, sotto un diametro apparente maggiore di quello che sarebbe senza lente. La fig. 313 mostra come si forma in tal caso l'imagine. L'attitudine poi dell'istrumento ad aiutare l'occhio nella visione, ossia il suo ingrandimento, va misurata dal rapporto del diametro apparente dell'imagine vista attraverso alla lente, al diametro apparente dell'oggetto visto ad occhio nudo.

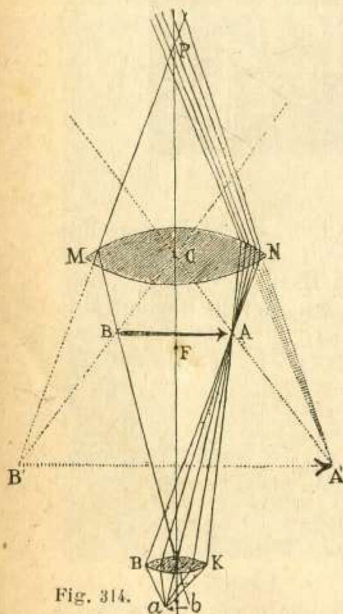


Fig. 314.

289. **Microscopio composto.** — Un obiettivo di brevissima distanza focale ed un oculare convergente, bene centrati e situati in modo che la loro distanza sia notevolmente maggiore della somma delle rispettive distanze focali, costituiscono un *microscopio composto.*

L'oggetto *ab* va posto dinanzi all'obiettivo *BK*, ad una distanza appena maggiore della sua distanza focale (fig. 314). L'obiettivo ne fornisce un'imagine reale *AB* rovescia e più grande; allora, posto l'occhio all'oculare *MN*, si fa

variare la distanza dell'oggetto dall'obiettivo, finchè l'imagine virtuale $A' B'$ fornita dall'oculare che funziona da microscopio semplice, sia vista nitidamente, si formi cioè alla distanza per cui l'occhio è accomodato. E siccome questa è una distanza finita, ne segue che l'imagine $A B$ fornita dall'obiettivo deve cadere fra l'oculare e il suo primo fuoco, e in prossimità di questo.

La stessa figura mostra l'andamento de' fascetti luminosi, e fa vedere come il *campo del microscopio*, ossia lo spazio angolare che si può abbracciare coll'occhio, è determinato dal cono che ha per vertice il centro ottico O dell'obiettivo e per base l'oculare $M N$.

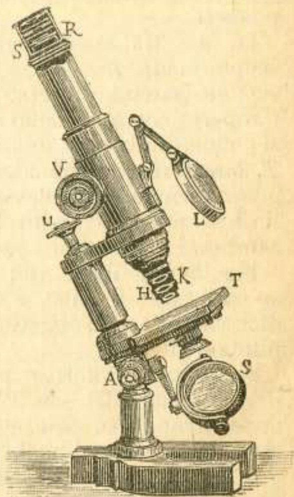


Fig. 315.

L'occhio si dovrà tenere nel punto P detto *punto oculare*, dove passano tutti gli assi de' fascetti luminosi emessi dai vari punti dell'oggetto.

L'imagine virtuale fornita dall'oculare è maggiore dell'imagine fornita dall'obiettivo, e questa è alla sua volta maggiore dell'oggetto; l'ingrandimento è pertanto il prodotto dell'ingrandimento dell'obiettivo e di quello dell'oculare: con questo strumento si arriva ad ingrandimenti che non si potrebbero ottenere col microscopio semplice. Noteremo particolarmente che l'obiettivo del microscopio dovendo

avere breve distanza focale, viene formato, per evitare l'aberrazione sferica e cromatica, da due o tre piccole lenti convergenti acromatiche, con i centri sopra una medesima linea retta che è l'asse dell'istrumento; questo sistema equivale ad una unica lente, la cui distanza focale è la metà o la terza parte di ciascuna delle lenti componenti.

La fig. 315 mostra nel suo insieme un microscopio composto. L'oggetto da esaminare è messo su una lastrina di vetro (lastrina porta-oggetti), ed è coperto con un vetrino molto sottile (copri-oggetti): si colloca sulla piattaforma o tavolino porta-oggetti *T*, forata in corrispondenza dell'oggetto, e lo si illumina con la luce riflessa da uno specchio sferico *S*. Il tubo porta avvitato l'obiettivo *HK*, e all'altra estremità è adattato l'oculare *SR*.

Per mezzo delle viti micrometriche *V* ed *U* si sposta tutto il tubo, e si regola così la distanza dell'obiettivo dall'oggetto finchè l'imagine sia vista nitidamente.

Se l'oggetto microscopico non fosse trasparente, il che accade di rado, l'illuminazione sarebbe fatta concentrando su esso, col mezzo di una lente *L*, la luce del giorno o quella di una lampada.

290. **Misura sperimentale dell'ingrandimento di un microscopio.** — Nella pratica l'ingrandimento del microscopio si determina sperimentalmente: all'uopo occorrono un *micrometro* ed una *camera chiara*. Il micrometro è una lastrina di vetro sulla quale sono tracciate divisioni metriche piccolissime, per esempio centesimi di millimetro; la camera chiara può essere costituita da un semplice specchietto piano portante nel mezzo un piccolo foro, ovvero da un prisma a riflessione totale convenientemente disposto, o più semplicemente an-

cora da una sottile lastrina di vetro trasparente a faccie ben piane e parallele.

Sia $O'O''$ (fig. 316) l'asse del microscopio; in M sul porta-oggetti si pone il micrometro; in S lo specchietto forato o la lastrina trasparente inclinata di 45° sull'asse $O'O''$; in L un regolo diviso in millimetri; in O, quanto più possibile vicino a S, l'occhio.

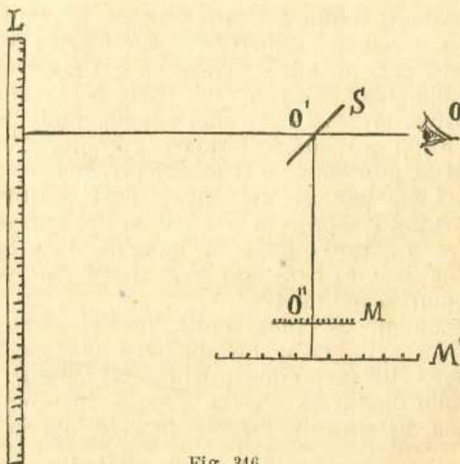


Fig. 316.

L'imagine ingrandita del micrometro M, che applicando l'occhio direttamente all'oculare del microscopio apparirebbe in M', riflessa da S apparirà invece dove è il regolo; e si potrà fare in modo che essa si sovrapponga al regolo stesso.

Si cercheranno allora i tratti che coincidono: se, per esempio, n divisioni dell'imagine del micrometro, ingrandite G volte dall'istrumento, ricoprono

n_1 millimetri, potremo scrivere che:

$$\frac{n}{100} G = n_1,$$

da cui:

$$G = \frac{100\, n_1}{n}.$$

Quando si voglia poi *misurare un oggetto microscopico*, è comodo ricorrere al *micrometro oculare*, disporre cioè un altro vetrino su cui sia tracciato un millimetro diviso in 100 parti fra l'oculare e l'obiettivo, là dove si forma l'imagine reale dell'oggetto. Ogni costruttore fornisce, a richiesta, oculari muniti di micrometro. Determinato una volta per sempre che $0^{mm}, 01$ del micrometro obiettivo sul porta-oggetti abbraccia n divisioni del micrometro oculare, è chiaro che se la imagine d'un oggetto ne occuperà n', l'oggetto sarà misurato da $n' : n$ centesimi di millimetro.

Per quanto si vada continuamente migliorando il microscopio, la teoria dichiara impossibile discernere distanze minori di un certo limite imposto dalla lunghezza d'onda. Per la luce bianca la minima distanza discernibile fu calcolata da Helmholtz di $\frac{1}{3636}$ mm. e di $\frac{1}{4654}$ mm. per la luce violetta, che ha le onde più corte.

Immergendo l'ultima lente dell'obiettivo in una goccia d'acqua, o di altro liquido più rifrangente, per esempio olio di garofani, che copra l'oggetto microscopico, questi limiti si impiccioliscono alquanto: la teoria indica che con tale disposizione non è impossibile discernere alla luce bianca distanze eguali a $\frac{1}{4848}$ mm. I limiti teorici si sono

quasi raggiunti in pratica, perchè i migliori microscopi di Hartnack rendono visibile nettamente alla luce bianca $\frac{1}{3313}$ mm. secondo Harting, o $\frac{1}{3500}$ mm. secondo Dippel.

Ogni microscopio ha il corredo di parecchi obiettivi e di parecchi oculari, per potere variare a piacere l'ingrandimento. D'ordinario si comincia l'osservazione con gli ingrandimenti più piccoli; si va poi mano mano aumentandoli.

La bontà di un microscopio non dipende solo dall'ingrandimento che esso produce, ma benanche dalla *chiarezza* colla quale ci fa vedere le imagini, e dal *potere risolutivo.*

Questi pregi possono essere constatati prendendo a osservare delle preparazioni tipiche, dette *testimonii,* come sarebbero certe diatomee, specie di alghe.

Il microscopio deve anche possedere un certo *potere penetrante,* deve cioè avere il pregio di farci vedere simultaneamente uno straterello alquanto profondo dell'oggetto; ed è pure un pregio che l'obiettivo resti un poco discosto dalla preparazione, affinchè vi si possa frapporre una sottile lastrina.

291. **Cannocchiale.** — Il *cannocchiale* è formato anch'esso come il microscopio, di un obiettivo acromatico e di un oculare: quello ha l'ufficio di fornire degli oggetti esterni imagini reali, nitide; questo di osservare tali imagini, e fa quindi le veci di un microscopio semplice. Mentre però il microscopio serve a permettere la visione di piccoli oggetti, che alla distanza del punto prossimo non avrebbero una grandezza apparente sufficiente per essere veduti, il cannocchiale serve invece a rendere sensibile ed a facilitare la visione di oggetti, che guardati

ad occhio nudo presenterebbero una grandezza apparente troppo piccola, non già perchè piccoli, ma perchè lontani.

Nel microscopio la distanza fra le due lenti è ben maggiore della somma delle distanze focali; nel cannocchiale invece, essendo l'oggetto lontanissimo, l'imagine data dall'obiettivo si forma quasi esattamente nel suo secondo piano focale; e poichè in vicinanza di detta imagine deve trovarsi il fuoco anteriore dell'oculare, ne viene che la distanza delle lenti è molto prossimamente eguale alla somma delle loro distanze focali.

Il microscopio è un istrumento a lenti fisse; difatti per vedere distintamente l'imagine si può regolare a piacere la distanza dell'obiettivo dall'oggetto; col cannocchiale invece questo non può farsi, e però, nel fine di vedere distintamente l'imagine, bisogna poter spostare a seconda dei casi l'oculare; il cannocchiale quindi è un sistema a lenti mobili. Inoltre, mentre nel microscopio l'ingrandimento è tanto più forte quanto è più piccola la distanza focale dell'obiettivo, nel cannocchiale succede il contrario; vale a dire bisogna, per aumentare l'ingrandimento, usare obiettivi di lunga distanza focale e di notevole apertura. Con ciò, aumentando la luce che concorre alla formazione delle imagini, queste riescono chiare a sufficienza per essere viste nitidamente.

La fig. 317 mostra l'andamento de' raggi e la formazione delle imagini nel cannocchiale astronomico: *b a* è l'oggetto osservato; l'obiettivo *H K* ne fornisce una imagine reale e rovescia in *A B*, molto vicino al suo secondo piano focale. L'oculare *M N* ne dà poi un'imagine virtuale *A' B'*. Col cannocchiale astronomico si vedono imagini rovescie degli oggetti, il che non è un inconveniente nelle

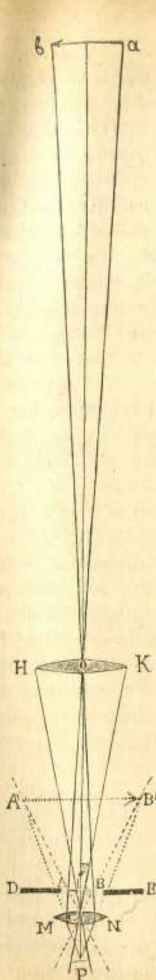


Fig. 317.

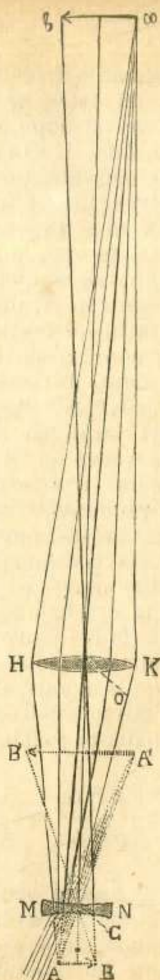


Fig. 318.

osservazioni astronomiche; ma quando si osservano oggetti terrestri, si richiede che le imagini siano diritte. A tal uopo si adoperano altri oculari: nel *cannocchiale di Galileo*, per esempio, le imagini sono raddrizzate con un oculare formato da un'unica lente divergente. L'imagine reale fornita dall'obiettivo HK (fig. 318) si formerebbe, senza la lente divergente, in AB, un po' al di là del suo primo fuoco; ma accade che il fascio di raggi luminosi concorrenti in A, per esempio, è trasformato dall'oculare in un fascio di raggi divergenti, che prolungati concorrono in A'; quivi pertanto l'occhio posto dietro la lente MN vedrà la imagine dal punto obiettivo. Ragionando egualmente per tutti gli altri punti di AB, si capisce in qual modo l'occhio vedrà in $A'B'$ la imagine dell'oggetto, la quale sarà virtuale e diritta con esso.

L'ingrandimento di un cannocchiale è dato dal rapporto de' due angoli $A'CB'$ e bOa (fig. 317) sotto i quali si vede l'imagine nell'istrumento e l'oggetto ad occhio nudo; ed è facile vedere che con l'istrumento in condizione telescopica, supponendo cioè che il 2° fuoco dell'obiettivo coincida con il 1° fuoco dell'oculare, il detto ingrandimento (*ingrandimento normale*) è uguale al rapporto delle distanze focali dell'obiettivo e dell'oculare. Indicando con f_1 e f_2 le dette distanze focali, si ha difatti:

$$G_n = \frac{A'\widehat{C}B'}{a\widehat{O}b} = \frac{A\widehat{C}B}{A\widehat{O}B} = \frac{AB}{f_2} : \frac{AB}{f_1} = \frac{f_1}{f_2} .$$

292. **Anello oculare.** — I raggi luminosi che dopo avere attraversato lo strumento emergono dall'oculare, si possono considerare come emessi dai punti dell'obiettivo. Questo dunque si comporta

rispetto all'oculare come un oggetto luminoso; e poichè si trova da esso a una distanza maggiore della distanza focale f_2, l'imagine che ne dà l'oculare è reale.

Questa imagine è un circoletto normale all'asse, che Biot chiamò *anello oculare;* gode della proprietà che tutti i raggi che attraversano lo strumento, passano per esso emergendo dall'oculare, giacchè ciascun punto dell'anello oculare ha per coniugato un punto corrispondente dell'obiettivo.

Il punto dove l'anello è incontrato dall'asse, è detto *punto oculare;* in esso s'incontrano gli assi di tutti i fascetti emergenti, e ivi va posto il centro della pupilla affinchè l'occhio accolga la quantità massima di luce. Si vede facilmente che se l'oculare è convergente, l'anello è esterno all'istrumento.

Per trovare il raggio r dell'anello oculare, osserviamo che essendo la faccia anteriore dell'obiettivo e l'anello oculare due figure coniugate, se con R si indica il raggio dell'obiettivo, con $l = f_1 + f_2$ la sua distanza dall'oculare, con x' la distanza dell'anello dall'oculare, si ha:

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f_2}$$

e:

$$\frac{R}{r} = \frac{l}{x'} = \frac{l - f_2}{f_2} = \frac{f_1}{f_2} = G_n .$$

Abbiamo così un altro modo più semplice di misurare l'ingrandimento angolare normale; questo cioè è dato dal rapporto fra il diametro dell'obiettivo e il diametro dell'anello oculare.

293. **Reticolo.** — Quando il cannocchiale serve a determinare una data direzione, o alla misura di angoli, il foro del diaframma porta due sottilis-

simi fili disposti in croce (fig. 319) od anche una lastrina di vetro con due sottili strie ad angolo retto. Questi fili o strie costituiscono il *micrometro* o *reticolo;* esso, trovandosi nello stesso piano dell'imagine reale fornita dall'obiettivo, è visto con l'oculare insieme a questa. La retta che unisce il punto d'incrociamento dei fili del reticolo con il centro ottico dell'obiettivo, è l'*asse ottico* o *linea di mira* del cannocchiale.

Il cannocchiale munito di reticolo è costrutto a questo modo: un tubo breve porta l'oculare che in tal caso è sempre convergente, e il suo primo fuoco è esterno alle lenti; si può pertanto fissare il reticolo in un tubo indipendente da quello dell'oculare, e spostare quest'ultimo rispetto al reticolo. Il sistema poi dei due tubi può a sua volta farsi avanzare, più o meno, entro il tubo maggiore che porta l'obiettivo; e con tale movimento d'insieme l'osservatore, dopo aver disposto l'oculare in modo da vedere nettamente il reticolo, può portare questo nel piano dove si forma l'imagine reale fornita dall'obiettivo: allora egli vedrà distintamente anche l'oggetto, poichè le imagini dell'oggetto e del reticolo date dall'oculare si sovrapporranno.

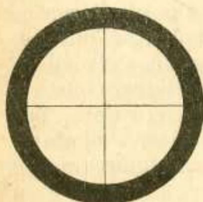


Fig. 319.

294. **Misura dell'ingrandimento di un cannocchiale; dinametri.** — Per misurare sperimentalmente l'ingrandimento di un cannocchiale, si possono adoperare parecchi metodi, diretti e indiretti. De' primi il più semplice consiste nel guardare con un occhio una scala graduata posta ad una conveniente distanza, e con l'altro la sua ima-

gine fornita dal cannocchiale; se una divisione dell'imagine copre *n* divisioni della scala viste ad occhio nudo, l'ingrandimento sarà appunto *n*.

Si possono anche paragonare le distanze alle quali due oggetti uguali devono essere collocati, acciocchè la grandezza apparente dell'uno guardato col cannocchiale sia uguale a quella dell'altro visto ad occhio nudo. A tale scopo si disegnano sopra due cartoni due circoli neri in campo bianco del diametro di 20 o 30 cm.; se ne porta uno ad una certa distanza, per es. 200 metri, e lo si osserva con un occhio attraverso al cannocchiale; l'altro circolo viene osservato direttamente coll'altro occhio, e lo si fa portare avanti e indietro da un assistente fino a che sembri della medesima grandezza di quello osservato coll'istrumento: non resta allora a fare altro che il rapporto delle distanze alle quali i due circoli sono dall'osservatore.

I metodi indiretti per la misura dell'ingrandimento si riducono sostanzialmente a due: il primo consiste nel trovare il rapporto:

$$G_n = \frac{f_1}{f_2}$$

cioè nel misurare separatamente le distanze focali dell'obiettivo e dell'oculare e nel farne il rapporto. La distanza focale f_1 dell'obiettivo, sempre notevole, si può misurare con sufficiente precisione; ma non è così facile la determinazione della distanza focale dell'oculare.

L'altro metodo indiretto consiste nel determinare il rapporto del diametro R dell'obiettivo a quello r dell'anello oculare. Per avere il diametro dell'obiettivo non c'è difficoltà: a misurare il diametro dell'anello oculare servono piccoli apparecchi detti

dinametri. Il dinametro più semplice è quello di Ramsden: esso consta di tre tubi C, B, A, che possono scorrere l'uno dentro all'altro; il tubo C è aperto da ambe le parti, ed è unito a un disco che mediante opportune viti può fissarsi all'oculare di un cannocchiale qualunque; il tubo B scorre dentro il tubo C, e alla sua base porta una piccola lastrina divisa in decimi di millimetro; il tubo A, scorrevole entro il secondo, porta un oculare che fa da microscopio semplice, e aiuta a vedere nettamente le divisioni del micrometro. Adattato il dinametro all'oculare del cannocchiale supposto in condizione telescopica, si volge questo verso una superficie uniformemente illuminata, o meglio verso la luce diffusa del cielo, e si muove il sistema dei due tubi A e B che portano il microscopio e il micrometro, fino a che il diametro dell'anello oculare sia minimo. Si contano allora le divisioni del micrometro che esso ricopre, e si ha il diametro r dell'anello oculare; il quoto $\frac{R}{r}$ è l'ingrandimento G_n.

295. **Chiarezza.** — Perdono o guadagnano in chiarezza gli oggetti, quando sono osservati col mezzo di un cannocchiale? La *chiarezza della visione* dipende dalla quantità di luce che concorre in ogni punto della imagine che si forma sulla retina; e tale quantità ha evidentemente un valore diverso, secondo che si guardi un oggetto ad occhio nudo, ovvero attraverso ad un cannocchiale. Noteremo che l'occhio nudo accoglie per ciascun punto dell'oggetto un fascetto conico che ha per base la pupilla; mentre guardando col cannocchiale, senza tener conto della perdita di luce per riflessione alle superficie delle lenti, ne riceve un fascio avente per base l'obiettivo. Da questo, parrebbe che la chiarezza dovesse aumentare, ma bisogna riflettere,

d'altro canto, che nel secondo caso la imagine retinea ha una superficie molto più estesa che nel primo, ciò che evidentemente deve affievolire la chiarezza medesima. Risulta dal calcolo che, quando si osservano imagini di qualche estensione, il secondo effetto suole predominare, cosicchè le imagini riescono meno chiare degli oggetti osservati ad occhio nudo; al contrario, quando l'imagine si riduce a un punto, come nell'osservazione delle stelle, manca la causa che produce la diminuzione di chiarezza, e le stelle si vedono più brillanti; e poichè il fondo del cielo si fa invece più oscuro, così avviene che certe stelle possono vedersi anche di giorno. Dalle cose dette si deduce che quanto maggiore è l'ingrandimento, tanto più la chiarezza tende a diminuire; si rimedia usando grandi obiettivi che accolgono molta luce; ma i grandi obiettivi sono di difficile costruzione e di grande costo. Il grande obiettivo del cannocchiale astronomico dell'Osservatorio di Brera di Milano, fu costruito dal Merz (Monaco di Baviera); esso ha il diametro di 487^{mm}, la distanza focale di 6^{m},85, e costò 38000 lire.

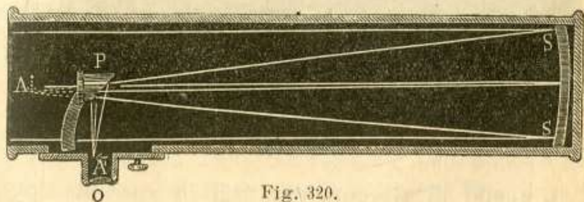


Fig. 320.

296. **Telescopi catottrici.** — Diamo un cenno anche dei *telescopi catottrici:* si chiamano così i telescopi che hanno per obiettivo uno specchio sferico concavo.

In quello di Newton (fig. 320) lo specchio *S S*, posto nel fondo di un largo e lungo tubo, darebbe dell'astro verso cui è rivolto una imagine in *A*; ma essa viene deviata da un piccolo prisma a riflessione totale in *A'*, dove si può osservarla comodamente con l'oculare *O*.

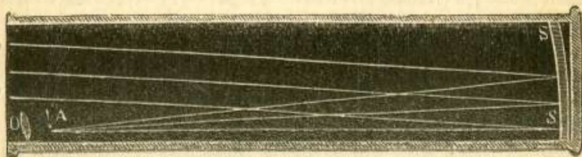


Fig. 321.

Il telescopio di Herschel (fig. 321) ha lo specchio concavo *S S* inclinato sull'asse, in modo che l'imagine reale *A* da esso fornita si può vedere attraverso all'oculare *O* da un osservatore che volge le spalle alla sorgente luminosa.

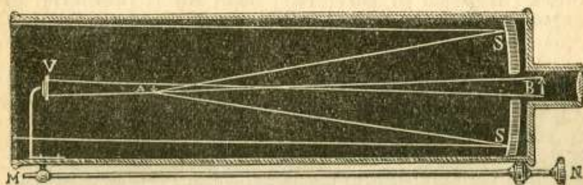


Fig. 322.

In quello di Gregory (fig. 322) lo specchio *S S*, forato nel centro, dà una imagine in *A*, fra il centro e il fuoco di un secondo specchio concavo *V*, il quale, alla sua volta, fornisce un'imagine reale ingrandita in *B*, dove viene osservata con un oculare. Il tirante serve a spostare lo specchio *V* e a mettere a fuoco.

297. **Norme pratiche per riconoscere la bontà d'un cannocchiale.** — La bontà d'un cannocchiale dipende non solo dalla precisione con cui sono costruite le lenti che lo compongono, ma anche dal modo più o meno perfetto col quale sono disposte le une rispetto alle altre.

Le due lenti che compongono l'obiettivo acromatico (fig. 296) devono essere ben centrate; e per riconoscere se ciò ha luogo vi ha un metodo semplicissimo dovuto al Wollaston. Tolto l'oculare del cannocchiale, si ponga in sua vece la fiamma d'una candela; ponendosi dalla parte dell'obiettivo, alla distanza di 40 o 50 cm., si vedrà una serie d'imagini della fiamma dentro il tubo ed anche avanti l'obiettivo, prodotte dalla riflessione della luce sulle diverse superficie del vetro. Se esse saranno in linea retta, l'obiettivo sarà centrato; in caso contrario, conviene muovere le due lenti nella loro incassatura finchè questa condizione sia verificata.

Le lenti dell'oculare devono avere anch'esse un medesimo asse, il quale deve coincidere con quello dell'obiettivo: per assicurarsi se ciò ha luogo, si rivolga il cannocchiale ad una stella di prima o di seconda grandezza, e si sposti di poco l'oculare dal punto della visione distinta; allora l'imagine della stella diviene sempre più confusa e s'ingrandisce: se si mantiene di forma circolare, le lenti sono centrate.

Per giudicare complessivamente della bontà d'un cannocchiale, il modo migliore e più spiccio è il seguente dovuto a Fraunhofer.

Su un foglio bianco si disegnino in nero alcune figure geometriche regolari, come per esempio circoli del diametro di 20 a 50 millimetri, oppure quadrati di 30 a 40 millimetri di lato, e si pongano

ad una distanza di 50 a 100 metri. Guardando codeste figure col cannocchiale, esso è buono se la forma di tali figure non sarà alterata, se i contorni appariranno ben definiti e non colorati, o al più leggermente azzurri.

I cannocchiali che servono alla osservazione degli astri, sono talora montati su macchine parallatiche di grande precisione che fanno descriver loro, intorno all'asse del mondo, un giro in un giorno sidereo.

Ai telescopi catottrici oggi sono generalmente preferiti quelli diottrici, che hanno sui primi non pochi vantaggi.

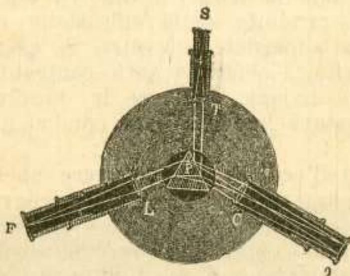


Fig. 323.

298. **Spettroscopia.** — Non possiamo lasciare di dire brevi parole sullo *spettroscopio.*

Questo strumento rappresentato dalla fig. 323 in prospettiva e dalla fig. 324 in sezione orizzontale, serve ad analizzare le luci irraggiate dalle diverse sorgenti. Nel centro di una piattaforma circolare è collocato un prisma *P* di vetro di flint, con i suoi spigoli perpendicolari alla piattaforma. La luce che si vuole analizzare passa per una fenditura *F*

parallela agli spigoli del prisma, e il fascetto de' raggi è reso parallelo da una lente *L* che si trova all'altra estremità del tubo detto *collimatore.* I raggi si rifrangono poi nel prisma *P*, che li separa a seconda del loro indice di rifrazione. Lo spettro così formato si osserva con un cannocchiale *C O*,

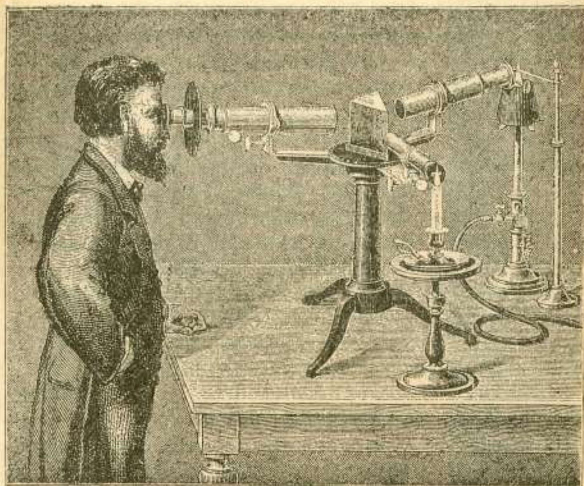


Fig. 324.

il quale rispetto alla faccia di emergenza del prisma, ha la stessa inclinazione del collimatore rispetto alla faccia dell'incidenza; la deviazione in tal caso è minima.

I solidi e i liquidi incandescenti danno spettri continui: lo spettro del sole invece è solcato da righe oscure, dette *righe di Fraunhofer*, il quale le studiò per il primo.

Di queste righe oscure le maggiori sono distinte con le lettere maiuscole dell'alfabeto. L'ultimo spettro della tavola messa in principio del libro, mostra la distribuzione di tali righe. A fissarne facilmente la posizione serve appunto il tubo *TS* dello spettroscopio; esso porta in *S*, dinanzi alla lente *T*, una scala fotografata su vetro che s'illumina con una fiamma: le divisioni di questa scala riflesse dalla faccia di emergenza del prisma, sono ingrandite dal cannocchiale, e viste parallelamente allo spettro.

Caratteristici sono gli spettri de' vapori: questi si ottengono portando ad alta temperatura le sostanze nella fiamma oscura di Bunsen, la quale consiste in una corrente di gas illuminante che brucia in una corrente d'aria. Tali spettri consistono in righe brillanti, diverse per la rifrangibilità e per il colore, a seconda della sostanza. Il vapore luminoso del sodio è caratterizzato da una riga gialla che ha lo stesso grado di rifrangibilità della riga *D* di Fraunhofer (spettro 1 della Tav.): il vapore del litio è caratterizzato da due righe, una nel rosso, l'altra nell'aranciato (spettro 2 della Tav.).

Volendo analizzare la luce de' gas, se ne riempie sotto piccola pressione de' tubi di vetro muniti all'estremità di elettrodi, come quelli della fig. 325, detti tubi di Geissler o di Plücker. Facendo passare nel tubo la scarica di un rocchetto di Ruhmkorff, il gas diventa luminoso e la sua luce, più intensa nel tratto capillare del tubo, serve a illuminare la fenditura dello spettroscopio. Così si constata, per esempio, che l'idrogeno dà uno spettro caratterizzato da tre righe, la prima nel rosso coincidente con la riga *C* di Fraunhofer, la seconda nel verde coincidente con la *F*, la terza nell'indaco coincidente con la *G* (spettro 6 della Tavola).

Bastano questi pochi cenni per intendere, come avendo alla mano delle tavole con gli spettri delle diverse sostanze, si possa riconoscere una di queste dallo spettro che essa fornisce: anzi, con tale metodo, si son potuti scoprire anche nuovi corpi semplici, come il gallio, il cesio, il rubidio, ecc.

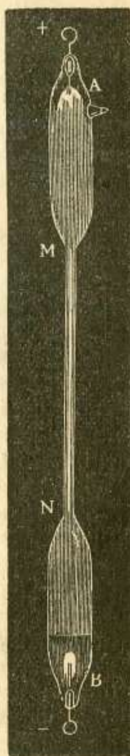


Fig. 325.

Che cosa significa la coincidenza delle righe brillanti di alcuni gas e vapori con altrettante righe oscure dello spettro solare? Ci duole non potere trattare col dovuto sviluppo tale questione: basterà sapere che una sostanza gasosa assorbe, ad una data temperatura, precisamente que' medesimi raggi che essa è capace di emettere. Le righe o fascie oscure di assorbimento de' vapori e dei gas — vale a dire le righe o fascie che compaiono in uno spettro continuo, quando essi sono interposti fra la sorgente e il prisma — coincidono con quelle brillanti che gli stessi corpi forniscono, se si esamina il loro spettro di emissione. Il vapore di sodio, per esempio, che alla temperatura della fiamma Bunsen emette una luce gialla caratteristica, assorbe precisamente questa stessa luce quando un fascio intenso di luce bianca l'attraversa. L'esperimento può farsi illuminando la fenditura dello spettroscopio colla luce di una lampada elettrica; se allora si interpone tra questa e la fenditura una fiamma Bunsen tinta in

giallo dal vapore di sodio, si vedrà apparire una riga oscura precisamente alla divisione della scala dove il sodio mostra la sua riga gialla.

L'applicazione di questo principio, dovuto al Kirchhoff, è importantissima: le righe oscure di Fraunhofer sono righe di assorbimento, dovuto alle sostanze che allo stato di gas o di vapori si trovano nell'atmosfera solare. Questi studi hanno mostrato che il sole consiste in una sfera luminosa, capace di dare, se esistesse sola, uno spettro continuo; essa però è circondata da un'atmosfera di gas e di vapori relativamente più freddi del nucleo, i quali assorbono le radiazioni corrispondenti alle righe oscure di Fraunhofer. Ne viene che a comporre l'atmosfera solare entrano solamente quelle sostanze, le cui linee brillanti degli spettri di emissione coincidono con altrettante righe oscure dello spettro solare: tali sono il ferro, l'idrogeno, il sodio, il calcio, ecc., e molte e molte altre. Invece altre sostanze, per esempio il piombo, danno spettri le cui linee brillanti non trovano le corrispondenti in quelle oscure di Fraunhofer; queste sostanze pertanto non entrano a far parte dell'atmosfera solare.

299. **Assorbimento dell'energia.** — I raggi assorbiti non vanno perduti, ma sono convertiti in altre forme di energia. Succede nell'assorbimento dell'energia raggiante qualche cosa di analogo al fenomeno della risonanza (§ 167), per cui un corpo sonoro qualunque non entra in vibrazione, se per l'aria non si propaga un sistema d'onde eguale a quello che esso, vibrando, potrebbe suscitare; allo stesso modo le onde eteree incontrando nella loro propagazione le molecole e gli atomi de' corpi, cedono a questi la propria energia, se il periodo di vibrazione si accorda, o è molto vicino a quello delle onde stesse. L'energia eterea ceduta alle mo-

lecole dei corpi aumenta in generale la forza viva di queste, e produce solo riscaldamento se il numero delle vibrazioni loro non supera i 400 bilioni al secondo; ma se le molecole vibrano più rapidamente si hanno fenomeni di *fosforescenza*, vale a dire l'energia assorbita viene di nuovo comunicata all'etere e riproduce la luce. Oltre a ciò può accadere, a seconda del corpo che assorbe l'energia, che i raggi assorbiti determinino delle azioni chimiche, come per es. gli effetti fotografici, la vegetazione.

300. **Radiometro.** — E poichè l'energia raggiante aumenta la velocità delle molecole, non potrebbe forse mettere in moto delle masse visibili? Si credeva di avere affermativamente risoluto il problema con il *radiometro.* Consiste questo interessante strumento in un mulinello leggerissimo (fig. 326), con le alette di mica o di alluminio affumicate dalla stessa parte sopra una sola faccia, il quale è girevole fra due punte nell'interno di un palloncino dove l'aria viene gradatamente rarefatta.

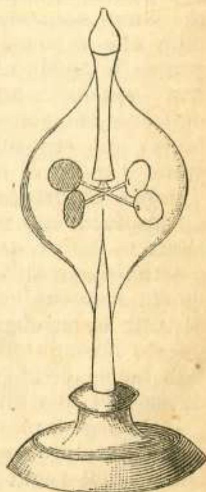


Fig. 326.

Basta appressare all'istrumento la fiamma di una candela, di un cerino, ecc., o esporlo al sole, che il mulinello si mette subito a girare, come se le faccie annerite fossero respinte dalla luce. Si verifica poi che il numero dei giri nell'unità di tempo è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente luminosa, supposta a distanza

finita, cosicchè questo apparecchio potrebbe servire a misurare l'energia raggiante. Ma la propulsione del mulinello non è esercitata direttamente dalla sorgente luminosa, come si credeva, sibbene da forze motrici interne; si può provare questa cosa sospendendo il palloncino ad un filo, giacchè mentre il mulinello ruota in un verso, il palloncino gira nel verso contrario. Siffatte forze interne sono dovute alle molecole di aria residua, che urtando contro le faccie affumicate e più calde, retrocedono con velocità maggiore di quella posseduta dalle molecole che contemporaneamente si spiccano dalla faccia opposta; onde, per reazione, il mulinello assume il moto di rotazioue nel verso che si è detto.

301. **Calorescenza e fosforescenza.** — Riguardo all'assorbimento dell'energia, e alla sua trasformazione in calore, teniamo presente che, come ora si è detto, si riscaldano di più, pari le altre condizioni, quelle sostanze che sono atte ad assorbire i raggi di tutte le rifrangibilità, come è il nero fumo. Per questo bisogna affumicare il bulbo del termometro e la faccia della pila termoelettrica, quando hanno da servire alla misura del calore raggiante.

Può accadere che un corpo assorba in tanta copia il calore oscuro da farsi rovente, e da emettere quindi raggi più rifrangibili di quelli assorbiti; tale fenomeno è detto *calorescenza.* All'incontro, la luce emessa nella *fosforescenza* è, in generale, meno rifrangibile della luce eccitatrice. Se si espone una sostanza fosforescente alla luce del sole, o a quella di una lampada elettrica o del magnesio, portando di poi il corpo nell'oscurità, lo si vede rilucere come fa il fosforo sfregato contro un corpo umido, ed è facile convincersi che sono specialmente i raggi dotati di azione chimica, cioè gli azzurri, i violetti e gli ultravioletti, quelli più atti a destare la

fosforescenza. Le sostanze fosforescenti sono molte, ma certi solfuri di stronzio e di calcio godono di questa proprietà in modo eminente: essi conservano la loro luminosità anche molto tempo dopo che furono esposti alla luce. Quando la fosforescenza dura pochissimo, ossia cessa subito al cessare della luce eccitatrice, il fenomeno prende il nome di *fluorescenza:* sono sostanze fluorescenti il vetro d'uranio che emette una luce color verde-pisello; la soluzione nell'acqua di bisolfato di chinina, quella diesculina (sostanza contenuta nella corteccia verde dell'ipocastano), le quali splendono d'una bella luce turchina; i platino-cianuri di bario, di potassio, e tante altre sostanze.

Se si accoglie lo spettro solare sopra una lastra fotografica, si trova che questa viene decomposta dalla riga *E* del Fraunhofer in poi; e la impressione si estende molto al di là del violetto; ciò prova che vi sono raggi più rifrangibili del violetto che l'occhio non vede: sono questi i raggi attinici o ultravioletti.

Questi raggi formano uno spettro più o meno esteso, a seconda della sorgente e della sostanza del prisma. La luce elettrica, come quella del sole, è molto ricca di tali raggi, e il quarzo è per essi molto trasparente; anche il vetro li lascia passare, ma in grado minore del quarzo. Volendo quindi studiare i raggi ultravioletti converrebbe adoperare prismi e lenti di quarzo.

I raggi attinici, come gli azzurri e i violetti, hanno una grande efficacia chimica, e però agiscono sulle lastre fotografiche. I raggi rossi invece non sono atti a decomporre i sali d'argento, e per questo il fotografo filtra, per così dire, attraverso i vetri rossi, la luce che serve a rischiarare le sue operazioni. Tuttavia non si può dire che i raggi rossi

non sieno atti a produrre alcuna azione chimica: ciò dipende della natura del corpo che li assorbe. Basti sapere che i raggi rossi sono anch'essi, come alcuni altri più rifrangibili, assorbiti dalla clorofilla delle piante, e concorrono con grande efficacia al lavoro chimico de' vegetali, che nelle parti verdi decompongono l'anidride carbonica, assimilando il carbonio e restituendo all'atmosfera l'ossigeno. Senza le piante dunque la provvisione di ossigeno dell'atmosfera a quest'ora sarebbe finita, e la vita animale non sarebbe possibile.

302. **Fotografia.** — Il processo fotografico più comune consta della *prova negativa* su una lastra di vetro sensibile, e della *prova positiva* su un foglio.

L'imagine reale di un oggetto va a formarsi nella camera oscura su di una lastra di vetro smerigliata, che permette di vedere se essa è nitida (fig. 310). Si toglie poi questa lastra, e se ne pone in sua vece un'altra avente la superficie coperta da una sostanza sensibile (bromuro di argento), sulla quale agisce la luce. Avviene ora che, cadendo l'imagine dell'oggetto su questa sostanza, le parti più luminose dell'imagine modificano il sale di argento, mentre le parti oscure non lo modificano punto. Pertanto l'imagine stessa stampa da sè la propria impressione sulla lastra; la luce però avrà appena iniziato la decomposizione del sale aloide d'argento, e affinchè appaia nettamente l'imagine bisogna trattare la lastra con un agente rivelatore come, per esempio, il solfato ferroso, l'idrochinone; allora la *imagine negativa* compare con tinte più o meno oscure nelle parti ch'erano in luce durante l'esposizione. È necessario di poi fissare la imagine, sciogliendo tutto il rimanente bromuro d'argento con iposolfito di sodio. Da ultimo si lava abbondantemente la lastra, e si asciuga. In questa imagine

però le parti chiare dell'oggetto appaiono oscure e viceversa, ed è perciò che essa è chiamata *negativa.*

Per ottenere la *prova positiva*, si adagia la carta sensibilizzata — come le lastre, essa si trova in commercio — sulla faccia della lastra che porta la imagine negativa, e si espone alla luce diffusa del giorno per un tempo che la pratica suggerisce. Si imprimerà così sulla carta la *imagine positiva:* difatti la luce passa e annerisce la carta attraverso alle parti trasparenti della negativa, le quali corrispondono alle oscure dell'oggetto; e invece resta intercettata, lasciando la carta intatta, nelle regioni oscure e opache della negativa, che corrispondono appunto alle parti chiare dell'oggetto. Si lava poscia il foglio, e si fissa la imagine in un bagno di iposolfito e d'oro che scioglie il bromuro di argento indecomposto, e conferisce all'imagine tinte migliori. Il processo fotografico si compie con una nuova lavatura, e con l'asciugamento della positiva ottenuta.

CAPITOLO X.

Elettrostatica.

303. **Elettrizzazione per strofinìo. — Corpi buoni e cattivi conduttori dell'elettricità.** — Tutti sanno come certi corpi, quali l'ambra, la ceralacca, lo zolfo, il vetro, l'ebanite, ecc., acquistano collo strofinìo la proprietà di attirare i corpi leggeri. E poiché tale proprietà venne primamente riconosciuta nell'ambra dai Greci antichi, e questa è detta *electron,* si diede il nome di *elettricità* alla causa ignota che conferisce ai corpi la proprietà stessa; e si dicono elettrizzati i corpi che la posseggono.

Ora se si strofina con un panno di lana asciutto un bastone di vetro o di ebanite, e quindi si avvicina la parte strofinata a corpicciuoli leggeri, come pezzetti di carta, piume, pagliuzze, ecc., si osserva che questi sono attratti; ma se si ritenta l'esperienza con una verga di metallo tenuta in mano e strofinata similmente con un panno di lana, non si ottiene nessun segno di attrazione.

Per questo diverso contegno parrebbe che i metalli non possano elettrizzarsi collo strofinio, ma non è così: difatti se la verga di metallo è portata da un manico di ebanite o di vetro, e la terremo per esso, troveremo che il metallo collo stro-

finamento si elettrizza anch'esso, ossia può attrarre i corpi leggieri.

Sarà facile inoltre persuadersi che, mentre i primi corpi suddetti attirano i corpi leggieri soltanto nelle parti state strofinate, il metallo invece esercita codesta attrazione elettrica in tutti i punti della superficie; ma basterà toccarlo colla mano in un punto qualunque, affinchè esso perda del tutto la proprietà elettrica.

Perciò il vetro, la ceralacca, l'ebanite e tutti gli altri corpi che si comportano allo stesso modo, sono detti *coibenti*, od anche *cattivi conduttori* dell'elettricità, perocchè conservano localizzato e non lasciano passare lo *stato elettrico* acquistato. Laddove i metalli, e in generale i corpi umidi, sono detti *buoni conduttori*, perchè lasciano subitamente passare il proprio stato elettrico da un punto ad un altro della loro superficie, o in altri conduttori con i quali sono posti a contatto. Difatti si osserva che, toccando colla verga di metallo elettrizzata altri corpi metallici similmente montati su sostegni di ebanite o di vetro, lo stato elettrico si diffonde subito su di essi in tutta la loro estensione, mentre si indebolisce sulla verga primitiva. Ciò induce ad ammettere che la verga di metallo, tenuta direttamente in mano, si elettrizza collo strofinio, ma l'elettricità destata si disperde passando attraverso alla mano e al corpo dello sperimentatore nella terra. Insomma tutti i corpi sono elettrizzabili collo strofinio, ma taluni sono cattivi conduttori, altri buoni conduttori dell'elettricità; e però un conduttore non può conservarsi elettrizzato se non è isolato dal suolo, cioè sostenuto e circondato da corpi cattivi conduttori.

304. **Due diversi stati elettrici.** — Sospendiamo ora, per mezzo di un filo isolante di seta,

una pallina di midollo di sambuco a un piede di vetro (fig. 327). Con questo semplice apparecchio ci sarà facile vedere che esistono *due opposti stati elettrici*, quello del vetro liscio strofinato con la lana, detto *stato elettrico positivo;* e quello della ceralacca strofinata allo stesso modo, detto *stato elettrico negativo*. Elettrizziamo prima una bacchetta di vetro confricandola con la lana, e presentiamola alla pallina che sarà attratta (fig. 328); a contatto del

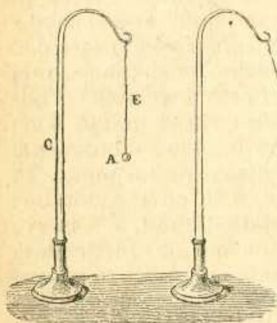


Fig. 327.

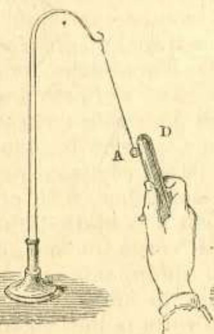


Fig. 328.

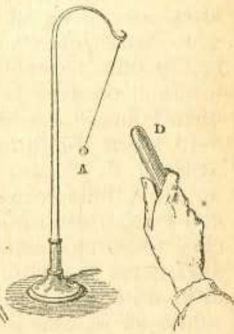


Fig. 329.

vetro, essendo essa conduttrice, acquista lo stesso stato elettrico che conserverà per qualche tempo, perchè il filo di seta, il sostegno di vetro e l'aria secca che la circonda sono isolanti. Ora si constata che la pallina, dopo avere toccato il vetro, non è più attratta da questo, ma invece viene respinta (fig. 329).

Prendiamo di poi un bastoncino di ceralacca; sfreghiamolo parimenti con un panno di lana, ed accostiamolo alla medesima pallina: questa, che sarebbe ancora respinta dal vetro, viene invece vi-

vamente attratta dalla ceralacca. Se invertiamo il piano di operazioni toccando da principio la pallina colla ceralacca elettrizzata, constateremo che mentre essa è respinta dalla ceralacca, viene invece attirata dal vetro.

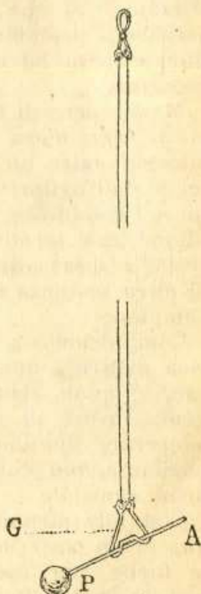


Fig. 330.

Del pari si respingono fra loro due bacchette di vetro, di ceralacca o di ebanite ecc., che siano state elettrizzate con lo strofinio: si può verificare facilmente questa cosa ponendone una in luogo dell'asticina *A P* in un gancio sostenuto da un nastrino di seta (fig. 330), e presentandole l'altra: ma se la bacchetta elettrizzata e sospesa nel modo dianzi detto è quella di vetro, accostandole la ceralacca o l'ebanite strofinate al solito modo, si verifica viva attrazione.

Impariamo da codeste esperienze che collo strofinio si destano due diversi e opposti stati elettrici, quello cioè del vetro e quello della ceralacca, strofinati entrambi con panno di lana; e di più l'esperienza dimostra che ogni altro corpo si comporta o come il vetro o come la ceralacca. Possiamo dunque concludere che *vi sono due, e due soli, stati elettrici, o, come anche si dice, due specie di elettricità: quella positiva del vetro liscio strofinato con la lana, e quella negativa della ceralacca strofinata pure con la lana; che corpi elet-*

trizzati dello stesso nome si respingono, e quelli elettrizzati di nome contrario si attraggono.

305. **Elettroscopi.** — Si chiama *elettroscopio* ogni apparato atto a rivelare se un corpo è elettrizzato, e di che segno. Il più semplice di tutti sarebbe il pendolino elettrico, ossia la leggiera pallina sospesa ad un filo di seta che abbiamo ora descritto.

Meglio però di tale pendolino serve l'*elettroscopio a foglie d'oro.* Due foglie d'oro (fig. 331), sono sospese entro un recipiente di vetro che le protegge dall'agitazione dell'aria; esse costituiscono un sol conduttore isolato insieme con l'asticella di ottone che termina superiormente con una sferetta, e passa attraverso a un tappo di ebanite o di altra sostanza isolante, che chiude il collo della campana.

Comunicando a codesta pallina una debole carica elettrica, questa si diffonde alle foglioline di oro, le quali elettrizzandosi similmente si respingono. Invece di due foglioline d'oro, si possono adoperare due foglie di alluminio, od anche due pagliuzze, ma con queste ultime l'apparecchio è meno sensibile.

Con tale strumento si esplora facilmente il segno di un corpo elettrizzato. Se difatti si caricano le foglie, per esempio positivamente, toccandole con un bastoncino di vetro strofinato con un pannolana, si osserverà che avvicinando dalla lontana lo stesso bastoncino, le foglie si aprono di più; ma se si avvicina nello stesso modo la ceralacca strofinata parimenti con pannolana, le foglie invece si chiudono.

Quando poi la carica iniziale data alle foglie fosse negativa, esse si aprirebbero maggiormente avvicinando corpi elettrizzati negativamente, e ten-

derebbero a chiudersi avvicinando invece corpi elettrizzati positivamente.

Diciamo anche che per esplorare il segno dei corpi elettrizzati, si adopera spesso l'elettroscopio assai sensibile del Bohnenberger. In questo apparecchio (fig. 332) v'ha una sola foglia d'oro isolata che pende fra i poli opposti di due pile a secco dello Zamboni, i quali risultano permanentemente

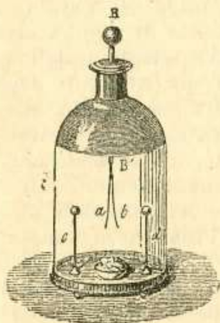


Fig. 331.

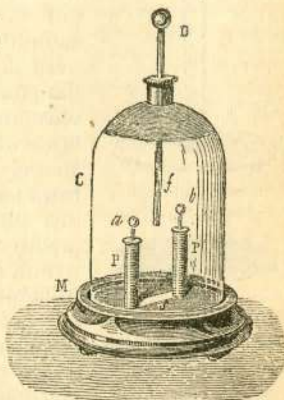


Fig. 332.

elettrizzati uno in + e l'altro in —. La foglia resta in equilibrio finchè non sia elettrizzata, perchè allora è attratta egualmente dai due poli; ma appena le si comunica una carica elettrica per quanto debole, essa si sposta subito, essendo attratta dal polo di nome contrario e respinta da quello dello stesso nome; e così col deviare da una parte o dall'altra, mostra la specie dell'elettricità ricevuta.

306. **I due opposti stati elettrici si producono sempre simultaneamente nell'elettrizzazione dei corpi.** — L'elettroscopio del Bohnenberger, in grazia della sua grande sensibilità, si presta bene a riconoscere questo fatto importante, che *i due opposti stati elettrici si producono sempre simultaneamente nell'elettrizzazione dei corpi.* L'esperienza può farsi in diversi modi; il più semplice però consiste nel prendere due dischi coperti l'uno di flanella e l'altro di ceralacca, ciascuno munito di manico isolante (fig. 333); strofinandoli insieme, e poi accostandoli separatamente all'elettroscopio, si vedrà che il primo è elettrizzato positivamente, e il secondo negativamente; mantenendoli invece in contatto e accostandoli all'elettroscopio, l'insieme si comporta come un corpo neutro e la foglia d'oro non si muove. Se invece del disco coperto di ceralacca si prende un disco di vetro, questo con la confricazione diventerà positivo e la flanella questa volta negativa; e si avranno ancora segni all'elettroscopio se saranno accostati separatamente e non uniti; le azioni delle due cariche contrarie sono dunque equivalenti.

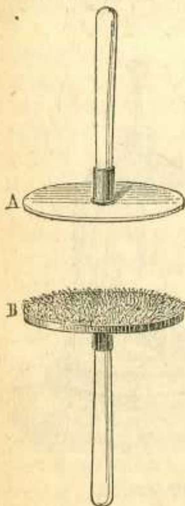


Fig. 333.

Pertanto non si può produrre uno stato elettrico senza che si manifesti nello stesso tempo anche l'opposto, e le quantità di elettricità così prodotte sono equivalenti. Di guisa che se non si separano i due corpi elettrizzati con lo strofinio, le azioni

loro, essendo contrarie, si elidono sui corpi esterni. Il segno elettrico poi che un corpo acquista collo strofinio, oltre che dalla sua natura e dallo stato della sua superficie, dipende anche dall'altro corpo adoperato: così, per esempio, mentre l'ebanite si elettrizza negativamente se è strofinata con la lana o, meglio ancora, con una pelliccia, assume invece lo stato elettrico positivo se vi si striscia sopra leggermente un pezzo di cuoio cosparso con amalgama. Così pure, nell'esempio precedente la lana si elettrizza in — col vetro, e in + con la ceralacca.

307. **Elettrizzazione per influenza.** — Abbiamo veduto che un conduttore isolato, portato a contatto di un corpo elettrizzato, acquista *per conduzione* lo stesso stato elettrico di questo; e di più che due corpi aventi uno stesso stato elettrico si respingono, mentre se sono oppostamente elettrizzati si attraggono. Ora vogliamo verificare che i corpi si elettrizzano anche senza il contatto, quando sono prossimi a un corpo elettrizzato.

La presenza in un dato luogo di un corpo elettrizzato modifica le condizioni dello spazio, per modo che i corpi che vi si trovano o vi vengono portati subiscono mutamenti nel loro stato elettrico. Cotesto spazio nel quale il corpo elettrizzato fa sentire la sua azione, si dice *campo elettrico;* e l'azione subita dal corpo che è nel campo, è detta *influenza* o *induzione elettrica.*

Si chiama poi corpo *influenzante* o *inducente* il corpo elettrizzato che esercita l'influenza; *influenzato* o *indotto* quello che la risente.

Le leggi principali dell'influenza elettrica sono le seguenti:

1. *Un corpo conduttore isolato, in presenza di un corpo elettrizzato, si elettrizza di nome contrario nella parte più vicina a questo, dello stesso nome*

nella parte più lontana: le due parti elettrizzate oppostamente sono separate da una zona neutra.

Sia *A* (fig. 334) il corpo influenzante, elettrizzato positivamente, per esempio; il conduttore soggetto all'influenza si caricherà negativamente in *B* nella parte più vicina ad *A*, e positivamente in *C* nella parte più lontana, mentre si conserverà allo stato neutro verso il mezzo.

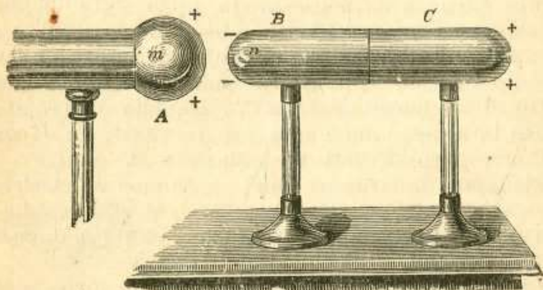


Fig. 334.

Il segno della carica elettrica si può esplorare con pendolini elettrici attaccati sul corpo influenzato, ai quali si accostino il vetro o la ceralacca strofinati con flanella; oppure col *piano di prova*, che consiste in un dischetto metallico fissato all'estremità di un manico coibente, il quale si porta a contatto della regione che si vuole esplorare, e poi subito all'elettroscopio. Servono anche molto bene le *polveri elettroscopiche*, consistenti in un miscuglio di fini polveri di minio e di zolfo, che mediante un soffietto si proiettano in prossimità dei corpi elettrizzati. Le polveri confricandosi fra di loro, si

elettrizzano di nome contrario: il minio diventa positivo e viene attratto dalla regione negativa, lo zolfo diventa negativo e ricopre la regione positiva.

2. *Scompare ogni segno elettrico scaricando il corpo influenzante, oppure allontanandolo a sufficiente distanza.*

3. *Scomponendo, mentre dura la influenza, il corpo influenzato in due parti* — col separare la regione *B* dalla *C* — *su quella che era più vicina al corpo influenzante si conserva la carica di nome opposto, sulla più lontana si conserva quella del medesimo nome.*

Si può riconoscere questo fatto, portando separatamente all'elettroscopio le due parti; ma se si riuniscono, non danno più alcun segno: ciò porta naturalmente ad ammettere che le due cariche opposte sono eguali in valore assoluto.

4. Da quanto precede si deduce questo altro fatto che, *facendo comunicare col suolo un conduttore, mentre è soggetto all'influenza di un corpo elettrizzato, esso si carica di elettricità opposta all'influenzante, giacchè allora forma un solo sistema conduttore con la terra, e la linea neutra si trasporta a distanza grandissima.*

Basta difatti toccare col dito il conduttore *BC* in un punto qualunque, per un istante; portando di poi *B* e *C* all'elettroscopio, insieme o separati, si constaterà che entrambi sono elettrizzati oppostamente al corpo influenzante; ovvero anche esplorandoli con la polvere elettroscopica, si vede che entrambi si ricoprono su tutta la loro estensione di una sola specie di polvere, per esempio di minio, se il corpo influenzante è positivo.

Per riprova si può adoperare come influenzante un corpo elettrizzato negativamente; si trova che le leggi del fenomeno sono le stesse.

5. *L'influenza di un corpo elettrizzato si esercita attraverso a qualsiasi corpo coibente, non già attraverso a conduttori di sufficiente estensione comunicanti con la terra.*

Se fra il corpo influenzante *A* e il conduttore cilindrico *BC* si colloca un corpo coibente, come vetro, zolfo, ebanite, olio di trementina, ecc., i fenomeni precedenti si verificano ancora. Interponendo invece una lastra conduttrice, si manifestano sempre più deboli quanto più essa è estesa; e cessano del tutto se la lastra è sufficientente estesa, e comunica col suolo. Pertanto se si vuol mettere un corpo al riparo dalla influenza di un corpo elettrizzato, basterà interporre fra essi un'ampia lastra metallica in buona comunicazione con la terra; la quale adempie così all'ufficio di un vero *schermo elettrico.*

Faraday suppose che l'azione induttrice a distanza venga trasmessa per mezzo delle particelle del corpo coibente interposto, le quali si *polarizzano* assumendo segni elettrici opposti alle loro estremità, e si dispongono secondo certe linee dette *linee di forza elettrica* (§ 325). Perciò egli propose di chiamare *dielettrici* i corpi coibenti che danno passaggio alle azioni elettriche, come *diafani* si dicono i corpi che trasmettono le vibrazioni luminose; mentre, al contrario, i corpi conduttori che non trasmettono le azioni elettriche, si comportano come i corpi opachi per la luce.

I fenomeni d'influenza poi riescono più o meno cospicui a seconda dei dielettrici interposti: si confrontano questi prendendoli dello stesso spessore, e sperimentando, s'intende, nello stesso modo. Per questo loro vario contegno, si dice che essi hanno un diverso *potere induttore specifico.* Ecco, per es., i poteri induttori specifici di alcuni corpi

spesso usati:

Aria	1
Solfo	2,6 a 3,2
Paraffina	1,8 a 3,5
Gommalacca . .	3.15
Vetro ordinario .	3 a 6.

Le differenze provengono dalla maggiore o minore purezza de' dielettrici, e dalla grande difficoltà delle misure di questo genere.

Si possono ripetere gli esperimenti dell'influenza elettrica in modo ancora più semplice, ricorrendo

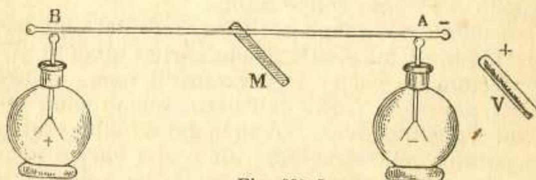


Fig. 335.

a due elettroscopi a foglie d'oro, come indica la fig. 335. Uniamoli con un'asticina metallica *A B* munita di un manico di ebanite *M*, e avviciniamo al conduttore una bacchetta *V* elettrizzata comunque; constateremo che, togliendo la comunicazione fra i due elettroscopi e allontanando poi il corpo influenzante *V*, le foglie d'oro de' due elettroscopi restano aperte. E si può provare che l'elettroscopio più vicino al corpo influenzante si è elettrizzato di segno contrario, e l'altro dello stesso segno: accostando difatti lo stesso corpo *V* al primo, le sue foglie si chiudono; mentre avvicinando *V* al più lontano, la divergenza delle foglie aumenta. Ristabilendo la comunicazione con l'asticella metallica, le foglie si chiudono, segno che i due stati elettrici

non solo erano opposti, ma equivalenti. Se, mentre gli elettroscopi comunicano fra loro, si approssima ancora il corpo elettrizzato *V*, le foglie si aprono come prima; ma facendo comunicare il sistema conduttore con la terra, toccandolo con il dito in un punto qualunque, le foglie si chiudono. Ora, togliendo prima la comunicazione con il suolo e allontanando di poi il corpo elettrizzato *V*, le foglie tornano ad aprirsi: la loro divergenza non varia, togliendo o ristabilendo la comunicazione fra esse: i due elettroscopi sono dunque elettrizzati entrambi dello stesso segno, e si constata che esso è contrario a quello del corpo influenzante.

Ora possiamo intendere la ragione del chiudersi delle foglie di un elettroscopio carico quando vi si approssima un corpo elettrizzato di nome contrario. Se, per es., le foglie dell'elettroscopio sono elettrizzate positivamente, avvicinando dalla lontana alla pallina dell'istrumento un corpo carico negativamente, esse, come sappiamo, si avvicinano tra loro: difatti il corpo negativo esercitando l'influenza sulle parti conduttrici dell'elettroscopio, elettrizza positivamente la sferetta, e negativamente le foglie Ma siccome queste erano prima elettrizzate positivamente, una parte della loro carica viene così neutralizzata, e perciò diminuisce la divergenza.

Se si approssima invece alla sferetta dell'elettroscopio un corpo elettrizzato positivamente, le foglie divergeranno ancor più, perchè cresce per influenza la loro carica positiva.

Nell' elettroscopio a una sola foglia d'oro del Bohnenberger, questa si elettrizza omonimamente al corpo influenzante, e però è attratta dal polo di nome contrario.

Si possono caricare le foglie di un elettroscopio con elettricità contraria a quella del corpo in-

fluenzante; a tale scopo basterà, mentre avviene l'influenza, porre la pallina in comunicazione col suolo per brevi istanti, e poi allontanare il corpo influenzante.

Risulta pure dalle cose dette che, avvicinando a un conduttore elettrizzato un altro conduttore comunicante colla terra, questo si carica di elettricità di segno contrario; e se la distanza non sarà troppo grande, potrà accadere che scocchi tra essi, attraverso all'aria, una *scintilla* dovuta al ricomporsi delle cariche di segno contrario.

308. **Legge di Coulomb sulle attrazioni e ripulsioni elettriche; unità di carica, il coulomb.** — È necessario ora dire la legge di codeste attrazioni o ripulsioni elettriche: essa venne scoperta col mezzo di numerose esperienze dal Coulomb, il quale premunendosi dalla dispersione dell'elettricità nel miglior modo possibile, misurò le dette azioni con l'opporre loro la forza elastica di torsione di un filo metallico. Sperimentando con sferette più o meno cariche e poste a distanze diverse, trovò che: *le azioni elettriche, attrattive o ripulsive, sono in ragione diretta delle quantità di elettricità messe in presenza, e in ragione inversa del quadrato della distanza.*

Se quindi q e q_1 indicano le quantità di elettricità messe in presenza, d la loro distanza, F la forza colla quale si attirano o si respingono, si ha:

$$F = \pm c . \frac{q q_1}{d^2} ,$$

dove il segno — corrisponde al caso dell'attrazione, e il segno + a quello della ripulsione. Il coefficiente c poi dipende dal mezzo nel quale si trovano le cariche elettriche. Per l'aria si conviene

di porlo eguale ad *uno*; ossia si assume come *unità di elettricità* quella carica positiva che, nell'aria, ne respinge colla forza *uno*, un'altra eguale posta all'*unità* di distanza. Adottando il sistema assoluto di misure (C. G. S.), la distanza va misurata in centimetri e la forza in dine [1]; per cui, nel detto sistema, l'*unità elettrostatica di quantità è la carica positiva, che agendo su una carica eguale posta alla distanza di un centimetro, la respinge, nell'aria, colla forza di una dina.*

Nell'industria si è adottata un'altra unità di quantità detta *coulomb*, più appropriata ai bisogni pratici: un coulomb corrisponde ad una quantità di elettricità $3 \cdot 10^9$ volte maggiore dell'unità elettrostatica suddetta.

La formula di Coulomb serve di fondamento alla teoria matematica dell'elettricità, come quella analoga di Newton della gravitazione universale è la base della meccanica celeste.

Per analogia si parla talvolta di *masse elettriche* come sinonimo di quantità di elettricità, e si considerano masse positive o negative *agenti a distanza.* Questo concetto delle azioni a distanza, e quindi di un mezzo inerte, è oramai abbandonato da tutti, poichè non solo ripugna alla mente di ammettere azioni a distanza, ma numerose e sicure sono le prove che la forza si trasmette mediante modificazioni del mezzo interposto (§ 325). Ad ogni modo la legge di Coulomb, come espressione di un fatto sperimentale, è di una verità indiscutibile; notiamo però esplicitamente che essa presuppone che le cariche si trovino in un mezzo omogeneo.

---

[1] Ricordiamo che la dina è una forza equivalente a $\frac{1^{gr}}{980}$, in quei paesi dove la gravità è uguale a 980 cm.

Sebbene Coulomb avesse eseguito le misure con grande diligenza ed esattezza, i numeri da lui trovati non soddisfacevano che in via approssimativa alla legge in discorso, a cagione specialmente degli effetti perturbatori della dispersione delle cariche, la quale è impossibile ad evitare del tutto; nondimeno non si può dubitare della *matematica esattezza* di detta legge, giacchè le molteplici deduzioni che col calcolo se ne traggono sono pienamente confermate dall'esperienza.

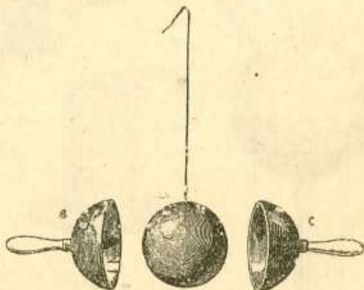


Fig. 336.

309. **L'elettricità si porta alla superficie dei conduttori.** — Una conseguenza della legge di Coulomb è che l'elettricità comunicata ad un conduttore si porta tutta alla sua superficie. Per verificare la cosa, si elettrizzi la sfera conduttrice *A* sospesa ad un filo di seta (fig. 336), e poi la si ricopra con due emisferi di ottone *B*, *C*, muniti di manichi isolanti, in modo che essi la tocchino; si constaterà, separandoli, che l'elettricità si è portata tutta su gli emisferi, e che la sfera *A* è allo stato neutro, perchè portandola a contatto della

sferetta di un elettroscopio, le foglie resteranno chiuse. Questa esperienza è dovuta a Cavendish.

Si può fare, allo stesso scopo, quest'altro esperimento: si elettrizzi un conduttore cavo, avente

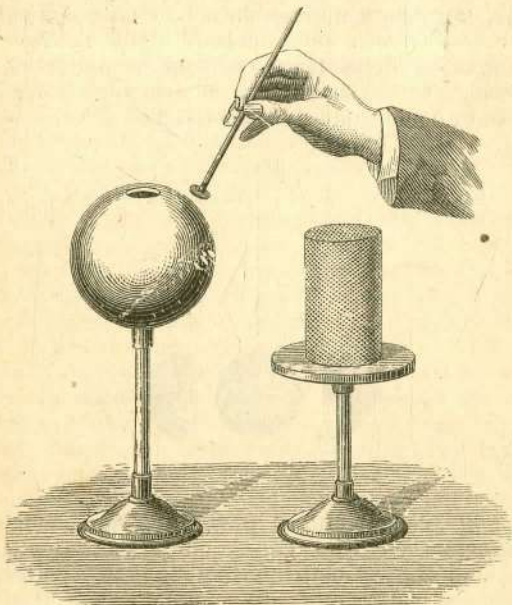


Fig. 337.

un'apertura che permetta di introdurre nell'interno un dischetto o una sferetta portati da un manico coibente (fig. 337); quando col dischetto si tocca un punto della superficie esterna del conduttore, si trova ch'esso si elettrizza; al contrario, se attraverso

all'apertura si tocca un punto della superficie interna, si ritira sempre il dischetto allo stato neutro.

Un metodo più semplice e più spedito ancora è quest'altro: si isoli un vaso metallico quasi chiuso, e lo si metta in comunicazione col bottone di un elettroscopio (fig. 338); introducendo in esso col mezzo di un manico coibente una sferetta elettrizzata, si vedrà subito per influenza divergere le foglie d'oro dell'elettroscopio; estraendo la pallina, le foglie si richiudono. Fin qui nulla di nuovo; ma se



Fig. 338.

con la pallina si tocca la parete interna del vaso, e poi la si estrae, si troverà carico il recipiente isolato e scarica la sferetta.

310. **Esperienza di Faraday.** — Fu inoltre accertato che l'elettricità distribuita alla superficie dei conduttori, o fuori di essi, non esercita azione alcuna nei punti interni; o, per dir meglio, è nulla in un punto interno qualunque la risultante di tutte le azioni elettriche dovute alle cariche superficiali o esterne. Faraday fece costrurre a tal fine un casotto di legno coperto di stagnola, e isolato su piedi di vetro; standovi egli dentro con elettroscopi ben delicati, non potè constatare il benchè menomo segno elettrico, neppure toccando le pareti col bottone dell' elettroscopio, mentre dal conduttore

fortemente carico si potevano di fuori tirare lunghe scintille.

La stessa esperienza si può più comodamente ripetere coprendo interamente un elettroscopio con una rete metallica isolata. Sebbene la superficie della rete non sia continua, mettendola in comunicazione con una macchina elettrica si potrà caricarla fortemente e tirarne vive scintille, ma le foglie dell'elettroscopio non divergeranno punto.

Se questa legge relativa all'interno dei conduttori è rigorosa, è rigorosa del pari la legge di Coulomb che si dimostra esserne una conseguenza.

S'impara da questa importante esperienza del Faraday, che una superficie metallica chiusa costituisce un perfetto riparo elettrico; e per questa ragione si suole ricoprire i delicati strumenti di misura elettrica (elettrometri) con involucri metallici, allo scopo di ripararli da esterne influenze.

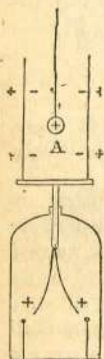


Fig. 339.

S'impara inoltre, in base allo stesso fatto, che il miglior modo di proteggere gli edifici dai danni del fulmine, è quello di costruire tutto intorno ad essi una rete metallica, a maglie larghe, fatta ben comunicare colla terra.

311. **Conduttore cavo.** — Prendiamo un recipiente metallico e poniamolo in comunicazione con un elettroscopio, come indica la fig. 338, o, anche, come mostra la fig. 339. Con l'uno o l'altro modo, ci sarà facile verificare sperimentalmente il seguente teorema, che, del resto, è una conseguenza immediata delle suddette leggi dell'influenza elettrica: « Se un corpo elettrizzato *A* è circondato completamente da un conduttore di forma qualunque, si produce

per influenza su la superficie interna di questo conduttore una carica elettrica eguale e di segno contrario a quella del corpo influenzante, la cui distribuzione dipende dalla posizione del corpo elettrizzato A; e sulla superficie esterna dello stesso conduttore una carica elettrica eguale e dello stesso segno, distribuita come se non vi fosse della elettricità all'interno.

Se poi il conduttore è messo in comunicazione con il suolo, la scarica esterna scompare, ma le cariche interne non sono punto modificate, e non esercitano alcuna azione all'esterno ».

Finalmente, se si fa comunicare per un istante il conduttore colla terra, mentre la sferetta A si trova nel suo interno, e poi si abbassa questa fino a toccare il conduttore, si vedrà che tanto questo quanto la sfera, dopo il contatto, sono completamente scarichi; la qual cosa prova che le loro cariche erano eguali e contrarie.

Or dunque, quando un conduttore elettrizzato si trova nel mezzo di una sala, potendosi questa paragonare al conduttore cavo della precedente esperienza messo in comunicazione con il suolo, le pareti si caricano di una equivalente elettricità di nome contrario; e quando il conduttore elettrizzato suddetto è fatto comunicare colle pareti, la sua elettricità dovrebbe portarsi all'esterno, ma trova la carica indotta di segno contrario e si neutralizza con essa. Cosi è che il corpo elettrizzato si scarica, e cosi dobbiamo intendere l'ufficio di *serbatoio comune* che fa la terra.

Osserveremo da ultimo che col mezzo di questo stesso apparecchio è facile vedere che con lo strofinio due corpi si caricano di quantità eguali e contrarie di elettricità. Difatti, se s'introduce nel conduttore della fig. 338, l'uno o l'altro de' dischi

della fig. 333, dopo averli confricati tra di loro, le foglie dell' elettroscopio divergono; ma se i due dischi sono introdotti contemporaneamente, le foglie non si aprono più, mostrando così che i corpi confricati hanno cariche eguali e di segno opposto.

312. **Distribuzione dell'elettricità; densità e tensione elettrica**. — In una sfera isolata, l'elettricità, per ragione di simmetria, si distribuisce uniformemente su tutti i punti: la qual cosa del resto si può verificare adagiando contemporaneamente più piani di prova eguali in diversi punti, e poi portandoli successivamente a contatto della sferetta di un elettroscopio; si osserverà per tutti la stessa divergenza delle foglie.

Se Q è la carica totale comunicata ad una sfera isolata di raggio R, quella di ciascuna unità di superficie, o, come si chiama, la *densità elettrica* ρ, sarà data dalla relazione:

$$\rho = \frac{Q}{4\pi R^2}.$$

In tutti gli altri casi in cui la distribuzione non sia uniforme, dividendo la carica totale per la superficie, si otterrebbe la densità media, la quale può essere molto diversa dalla vera in certi punti. Così, per esempio, sopra un elissoide la elettricità si raccoglie in maggior quantità all' estremità dell'asse maggiore, come sl può constatare col piano di prova; e in generale, la densità elettrica sopra un conduttore è maggiore in quei punti dove la superficie è più curva. Nei dischi si ha agli orli una densità tripla di quella del centro; negli angoli del cubo essa è circa quadrupla di quella del mezzo delle faccie.

La fig. 340 mostra con le linee punteggiate la distribuzione elettrica in alcuni casi particolari: in generale essa acquista una grande densità sugli spigoli e sulle punte. Ma col crescere della densità aumenta anche la *tensione* o *pressione elettrica*, ossia la pressione con la quale l'elettricità di un punto del conduttore tende a passare nell'aria

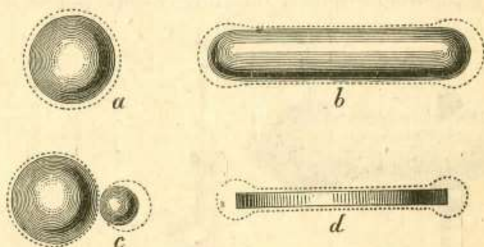


Fig. 340.

ambiente; si dimostra che fra la tensione T per unità di area e la densità ρ v'ha la relazione:

$$T = 2\pi\rho^2.$$

Così si vede che sulle parti sporgenti ben presto la tensione arriva al limite massimo, compatibile con la resistenza dell'aria; il qual limite è di circa mezzo grammo per centimetro quadrato.

313. **Potere delle punte.** — Questo limite è subito raggiunto sulle punte, le quali pertanto disperdono nell'aria l'elettricità dei conduttori con i quali comunicano: in ciò consiste il *potere delle punte*, e si capisce come non si possa riuscire a caricare fortemente un conduttore munito di una o più punte; e si comprende anche in qual modo accada che una punta in buona comunicazione con

la terra, presentata a un conduttore elettrizzato, prontamente lo scarichi, giacchè l'elettricità di nome contrario, promossa per influenza sulla punta, passa da questa all'aria e al conduttore, e tende a ridurlo allo stato naturale.

Se una punta lascia sfuggire l'elettricità nel mezzo di una massa d'aria che contiene in sospensione delle particelle solide o liquide, come, per es., quelle

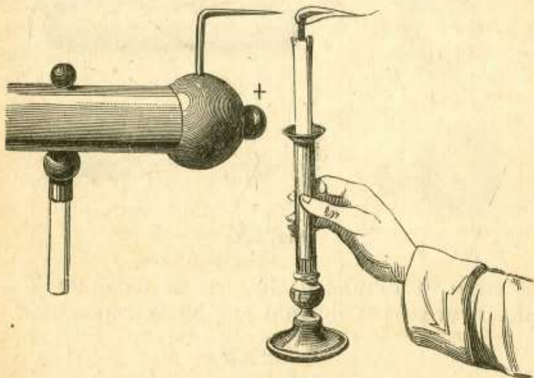


Fig. 341.

che formano il fumo, esse si elettrizzano; e precipitandosi poi verso un corpo carico di elettricità contraria, il fumo sparisce. Il processo è impiegato industrialmente in certi laboratori per la precipitazione di polveri dannose, sospese nell'aria. A tal fine due conduttori armati di punte sono posti in comunicazione, l'uno con una sorgente positiva, l'altro con una sorgente negativa; le polveri elettrizzate dall'uno vanno così a precipitarsi sull'altro.

Tanto con una punta positiva che con una negativa, le particelle di aria sono prima attratte ed elet-

trizzate, di poi vengono respinte perchè dello stesso segno del conduttore; si stabilisce così il *vento elettrico* sensibile alla mano e capace di piegare e spegnere anche la fiamma di una candela, come mostra la fig. 341, dove la punta è infissa sul conduttore di una macchina elettrica. Una stella di fili metallici terminati a punta e piegati ad angolo retto nello stesso verso e nello stesso piano, posta

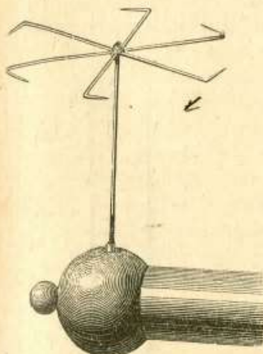


Fig. 342.

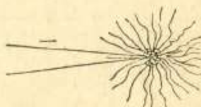


Fig. 343.

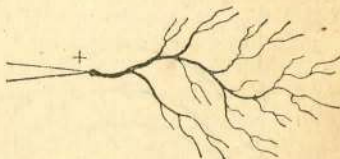


Fig. 344.

in bilico su una punta comunicante col conduttore della macchina in azione, gira come un mulinello in senso contrario alle punte, per effetto della reazione del moto delle molecole di aria (fig. 342).

Quando una punta disperde elettricità negativa, brilla su essa, nell'oscurità, una stelletta (fig. 343): se lascia invece sfuggire elettricità positiva, appare su lei un fiocco luminoso violaceo (fig. 344). Questi sono gli aspetti del fenomeno, quando l'elettricità passa da una punta nell'aria alla pressione ordinaria.

314. **Campo elettrico.** — Si è detto che un *campo elettrico* è lo spazio nel quale sono sensibili le azioni dovute ad una o più cariche elettriche. Il campo in un dato punto è definito dalla direzione e dalla intensità della forza risultante, la quale solleciterebbe l'unità di carica posta in quel punto. L'unità di carica, se

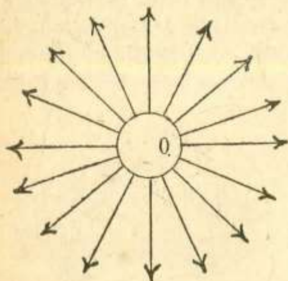


Fig. 345.

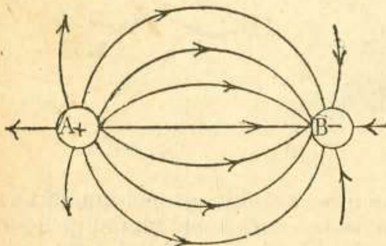


Fig. 346.

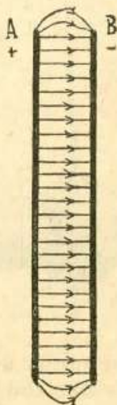


Fig. 347.

libera, si muove in ogni punto del campo secondo la direzione della forza elettrica; e poichè questa, in generale, cambia di direzione da un punto ad un altro, essa carica si moverà secondo una linea curva, tangente in ogni punto alla forza elettrica. Una tale linea è detta *linea di forza*, o *d'induzione.*

Il caso più semplice è quello del campo dovuto ad un punto elettrizzato che sia tutto all'intorno circondato dall'aria: le linee di forza o d'induzione sono allora rette divergenti che irradiano in modo simmetrico da quel punto. Parimenti, se la carica si trova distribuita sulla superficie di una sfera, la sua azione è la stessa come se fosse condensata nel centro, e le dette linee sono i raggi prolungati della sfera (fig. 545); internamente al conduttore però non vi sono linee di forza (§ 310).

La fig. 546 rappresenta il campo tra due sfere aventi cariche eguali e contrarie.

Il senso delle linee di forza si conviene vada dal corpo elettrizzato positivamente a quello elettrizzato negativamente.

In particolare il campo è uniforme quando in ciascun punto l'intensità e la direzione della forza sono sempre le stesse; tale è, per esempio, il campo compreso fra due conduttori piani, paralleli, sufficientemente estesi, carichi di quantità di elettricità eguali e contrarie. In questo caso, se si eccettuano gli orli, le linee di forza sono rette parallele normali ai piani, e l'intensità della forza è la stessa nello spazio compreso tra i due piani (fig. 347).

315. **Potenziale elettrico; unità de' potenziali, il volta.** — Conviene ora introdurre il concetto di *potenziale elettrico* che è fondamentale nei fenomeni elettrici, come il concetto della temperatura, col quale è analogo, è fondamentale nei fenomeni del calore. Il fare a meno del concetto del potenziale condurrebbe ad inesattezze e difficoltà per l'esposizione e lo studio dei fenomeni elettrici, quanto l'evitare di parlare di temperatura nello studio dei fenomeni del calore.

Il Volta fu tra i primi a concepire, con geniale intuizione, l'idea del potenziale nei fenomeni elet-

trici; soltanto che egli adoperò per esso l'espressione di *tensione assoluta*.

Se in un punto *A* di un campo elettrico si suppone un punto carico dell'unità di elettricità, esso sarà sollecitato a muoversi nella direzione che avrà ivi la forza risultante. Se tale moto sarà impedito da una causa qualunque, è chiaro che il punto elettrizzato si troverà nelle stesse condizioni di un corpo posto in alto rispetto alla gravità; sarà cioè in esso disponibile una certa quantità di energia di posizione o potenziale, la quale verrà misurata dal lavoro fatto dalla forza elettrica quando la detta unità di carica si moverà dal punto *A* fino a una distanza infinitamente grande. È questo lavoro meccanico che si chiama *potenziale elettrico nel punto A*. Esso è, in virtù del principio della conservazione dell'energia, indipendente dal cammino che si fa percorrere al punto elettrizzato; giacchè, se fosse differente il lavoro lungo due diverse vie, facendo percorrere all'unità di elettricità una via in un senso e l'altra in senso contrario, si sarebbe alla fine rimessa ogni cosa nello stato primiero, e tuttavia si avrebbe un guadagno o una perdita di lavoro, e quindi la creazione o la distruzione di una certa quantità di energia.

Il segno del potenziale è quello stesso del lavoro della forza elettrica durante lo spostamento: sarà positivo, se lo spostamento avviene nella direzione della forza stessa; negativo, se avviene nella direzione a questa contraria. Nel primo caso il potenziale esprime il lavoro fatto dalla forza elettrica dominante nel respingere l'unità di elettricità da quel punto a distanza infinita; nel secondo caso esso esprimerà il lavoro necessario a trasportare, in opposizione alla forza elettrica, l'unità di carica da quel punto all'infinito.

Dalla definizione suddetta risulta poi immediatamente che il lavoro della forza elettrica relativo allo spostamento dell'unità di elettricità da un punto ad un altro, è eguale alla differenza del potenziale in quei due punti. E poichè il lavoro di una forza è dato dal prodotto della sua intensità per lo spazio percorso dal suo punto di applicazione, così dividendo quella differenza per la distanza compresa fra i due punti, si avrà il valore della *forza media* agente tra essi. Se poi i due punti sono infinitamente vicini, il detto rapporto ci darà il valore vero della forza.

Il potenziale realmente non ha un valore nullo che a distanza infinita: ma poichè un conduttore che comunica con il suolo non manifesta alcun segno elettrico, si assume come zero relativo il potenziale della terra. Onde può dirsi che, *il potenziale in un punto esprime il lavoro eseguito dalle forze elettriche, o che bisogna spendere contro di esse, quando l'unità di elettricità passa da quel punto alla terra.*

Ne viene che il *valore numerico del potenziale in un punto qualunque, è il numero di unità di lavoro che corrisponde allo spostamento dell'unità di elettricità (positiva per definizione) da quel punto fino alla terra, qualunque sia il cammino percorso.*

L'unità pratica per la misura de' potenziali è il *volta* [1], che è $\frac{1}{300}$ dell'unità assoluta del sistema C. G. S. Il volta è prossimamente la differenza di potenziale ai due poli di un elemento *Daniell;* si richiede la differenza di potenziale di circa 4800 volta, affinchè la scintilla scocchi nell'aria libera

[1] Dal nome dal nostro Volta, inventore della pila.

tra due sferette eguali aventi 1 centim. di diametro, alla distanza di 1 millim.

Si dice *superficie equipotenziale* od anche *superficie di livello* il luogo dei punti ai quali corrisponde uno stesso valore del potenziale; non si fa evidentemente alcun lavoro nello spostare comunque delle cariche elettriche sopra una superficie equipotenziale, e però la direzione della forza deve essere in ogni punto normale alla detta superficie. Una linea di forza deve quindi incontrare ortogonalmente tutte le superficie di livello; essa in un punto qualsiasi coincide colla direzione del campo. Nel caso che il campo sia dovuto a un punto elettrizzato, le superficie equipotenziali sono evidentemente sfere che hanno per centro il detto punto, e le linee di forza sono, come si è notato, i raggi di tali sfere.

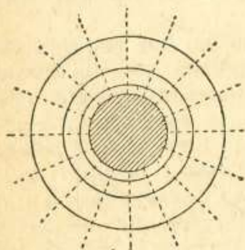


Fig. 348.

Come nel caso di un punto, così in quello d'una sfera elettrizzata, si comprende tosto, per ragione di simmetria, che le varie superficie di livello sono delle sfere concentriche al conduttore, e le linee di forza i raggi di queste sfere indefinitamente prolungati (fig. 348).

La traccia delle superficie di livello e delle linee di forza di un campo elettrico ne facilita grandemente lo studio, specialmente se si tiene la seguente regola. Si imagini divisa la superficie del conduttore in tante piccole aree contigue aventi ciascuna l'unità di elettricità, e si traccino le linee di forza partenti da tutti i punti dei contorni. Si otterranno così dei *tubi di forza unità*. Parimenti, si supponga

di tracciare tutte le superficie di livello corrispondenti a valori del potenziale diversi l'uno dall'altro di una unità; l'intiero campo resterà in tal modo diviso in tante concamerazioni o cellette, la cui forma e la cui distribuzione serviranno a far conoscere completamente la distribuzione dell'energia nel campo.

Inteso poi il significato del potenziale, è chiaro che se una carica q passa da un punto di potenziale V_1 a un altro di potenziale V_2, il lavoro delle forze elettriche sarà dato da:

$$(1) \qquad L = q(V_1 - V_2).$$

Premesse queste nozioni, studiamo ora il moto di una carica positiva q' rispetto alle altre cariche supposte fisse. Se la carica q' si trova in un punto nel quale il potenziale è positivo, essa sarà respinta, e però sollecitata a recarsi in punti ove il potenziale acquista valori mano a mano minori.

La stessa cosa succede quando la carica positiva q' si trovasse in un punto dove il potenziale fosse negativo; perchè allora q' sarebbe attratta, e quindi sollecitata a portarsi in punti dove il potenziale, conservandosi negativo, acquista valori assoluti a grado a grado crescenti.

Si vede dunque che, *l'elettricità positiva è sollecitata a trasportarsi dai punti di potenziale più alto verso quelli di potenziale più basso.*

Ne segue che congiungendo con un filo due conduttori isolati, aventi potenziali diversi, l'elettricità positiva dovrà passare da quello di maggior potenziale all'altro, finchè entrambi non abbiano acquistato il medesimo potenziale.

E se si farà comunicare un sistema di conduttori con la terra, si ridurranno tutti al potenziale

zero di questa, qualunque sia stato prima il valore del potenziale di ciascuno di essi.

Ricordando poi il fatto fondamentale che la risultante delle azioni elettriche dovute a cariche superficiali o esterne in equilibrio, è nulla nei punti interni di un conduttore qualunque, si deduce dalle cose dette che tutti i suoi punti, tanto interni quanto della superficie, devono avere lo stesso potenziale. La superficie del conduttore quindi è una superficie di livello elettrico.

Vogliamo infine notare la stretta analogia che corre tra il potenziale elettrico e il livello dei liquidi: come in un liquido pesante in equilibrio i punti della superficie libera si trovano tutti al medesimo livello, così i punti di un conduttore elettrizzato in equilibrio si trovano tutti al medesimo potenziale. Come facendo comunicare fra di loro parecchi vasi aventi capacità eguali o diverse, uno stesso liquido si distribuisce in modo che le superficie libere siano in tutti al medesimo livello, così facendo comunicare tra loro più conduttori elettrizzati, l'intero sistema acquisterà uno stesso potenziale.

Nè meno evidente è l'analogia del potenziale elettrico colla temperatura dei corpi, come si è già accennato: anche il calore, come l'elettricità, tende a scender di livello, a passare cioè dai corpi più caldi a quelli più freddi, finchè non si è raggiunto uno stesso livello calorifico o temperatura.

316. **Capacità elettrica; unità della capacità, il farad.** — L'esperienza insegna che si richiedono, in generale, quantità di elettricità diverse per portare i vari conduttori ad uno stesso potenziale: questo fatto si esprime dicendo che i diversi conduttori hanno una diversa *capacità elettrica*. Propriamente, la capacità di un conduttore si misura

dalla quantità di elettricità necessaria per elevarne il potenziale di *uno;* cosicchè, se si richiedono Q unità di carica per elevare il potenziale di un conduttore da zero a V, la sua capacità C sarà data da:

$$C = \frac{Q}{V}. \tag{2}$$

Un conduttore qualsiasi, lontano da ogni altro corpo, ha una capacità costante che dipende soltanto dalla forma e dall'estensione della sua superficie esterna: per esempio, una sfera conduttrice di dato raggio, piena o vuota che sia, di qualunque materia, ha sempre una stessa capacità eguale al raggio, purchè lontana da ogni altro conduttore.

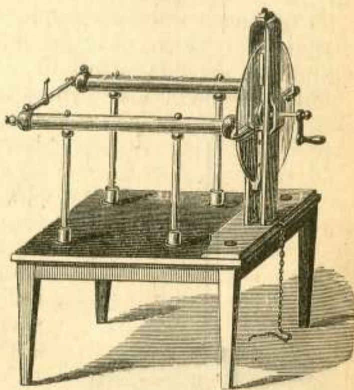


Fig. 349.

Se nella (2) si esprime Q in coulomb e V in volta, la capacità C risulta espressa in *faraday* o *farad* [1], come si dice per abbreviare. Questa unità dunque è la capacità che 1 coulomb porta a 1 volta. È una unità molto grande, e perciò nella pratica si adotta il *microfarad*, eguale a un milionesimo di farad.

317. **Macchine elettriche: macchine a strofinio, elettroforo, duplicatore del Belli, macchine a induzione di Voos e Wimshurst.** — Descriviamo

[1] Faraday fu celebre fisico inglese.

ora le *macchine elettriche a strofinio*, nelle quali l'elettrizzazione di un conduttore isolato è prodotta mercè lo strofinio di un disco di vetro contro due paia di cuscinetti disposti all'estremità di uno stesso diametro (fig. 349). I cuscinetti sono di cuoio imbottito di crine e spalmati con amalgama di zinco; essi d'ordinario sono fatti comunicare con il suolo. Il vetro si elettrizza positivamente, e poichè il conduttore è munito di due pettini metallici con le punte rivolte al vetro e collocati verso l'estremità del diametro normale a quello de' cuscinetti, l'elettricità del vetro, durante la rotazione, passa per influenza sul conduttore.

Ma tali macchine forniscono scarse quantità di elettricità, nè con esse si possono raggiungere potenziali molto alti, cosicchè oggi sono quasi del tutto messe in disparte. In loro vece sono molto adoperate le macchine ad influenza; ma prima di descriverle, converrà conoscere l'*elettroforo*. L'elettroforo fu inventato dal Volta nel 1775. In un piatto metallico *B* (fig. 350) si fonde un miscuglio di varie resine, che si lascia poi solidificare in modo che la superficie risulti levigata; siffatta *schiacciata* si può comodamente rimpiazzare con un disco di ebanite.

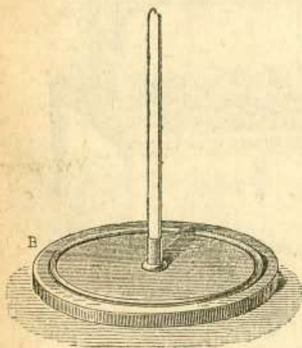


Fig. 350.

Vi si posa sopra il così detto *scudo*, che è un disco di metallo, od anche di legno ricoperto di stagnola, un po' più piccolo della schiacciata e

munito di manico isolante. L'insieme costituisce l'elettroforo.

Si confrica con pelle di gatto o con altra pelliccia la superficie della schiacciata, la quale si carica così negativamente; poi vi si applica lo scudo. Questo si elettrizza per influenza e non per conduzione, perchè per quanto siano piane le due superficie a contatto, sarà difficile che esse si tocchino in più di tre punti. Facendo per poco comunicare lo scudo con la terra toccandolo con un dito, e poi sollevandolo pel manico isolante, esso si trova carico di elettricità positiva, di elettricità cioè contraria a quella della schiacciata; la sua carica è sufficiente a dare una bella scintilla quando lo si accosta ad un conduttore comunicante con la terra. Si può ripetere l'esperienza quante volte si vuole, perocchè l'elettricità negativa della schiacciata si conserva a lungo nell'aria secca.

Se si solleva lo scudo senza averlo prima fatto comunicare col suolo, non si ottiene alcun effetto sensibile, perchè l'elettricità indotta positiva e quella negativa sono equivalenti e ristabiliscono lo stato naturale.

Questa manovra di adagiare lo scudo sulla schiacciata, di farlo comunicare colla terra, di sollevarlo, può esser fatta automaticamente mediante opportuni congegni meccanici, in guisa da rendere continua la produzione di queste cariche indotte. Tale è appunto il principio fondamentale del *duplicatore* del Belli, del *replenisher* (ricaricatore) di lord Kelvin, delle *macchine a influenza* di Holtz, di Voss e di Wimshurst.

Tutte queste macchine comprendono sempre un sistema induttore al quale è dovuto il campo, ed un sistema indotto che lo utilizza. Noi non possiamo spiegarle partitamente perocchè andremmo troppo

lungi dal fine che ci siamo proposti: è bene però sapere che esse derivano, nel fondamento, dal *duplicatore* del Belli (anno 1837), e dal *replenisher* di lord Kelvin (anno 1860), identico nel modo di funzionare al duplicatore.

Schematicamente i due apparecchi sono rappresentati dalla fig. 351: *A* e *B* sono due lamine metalliche sostenute da piedi isolanti; esse costituiscono gli *induttori* o *armature*; hanno forma di *U* nel duplicatore del Belli, e forma cilindrica circolare, come mostra la figura, nel ricaricatore di lord Kelvin, nel quale sono coassiali, con l'angolo al centro di 120° circa.

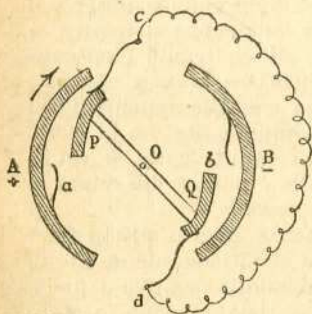


Fig. 351.

I due conduttori *A* e *B* godono, uno rispetto all'altro, l'ufficio di induttore e di collettore.

Due altri conduttori *P* e *Q*, detti i *portatori*, hanno forma di dischi nel duplicatore, e di settori cilindrici, ma non perfettamente circolari, nel ricaricatore: sono fissati all'estremità di un'asticciuola isolante (vetro od ebanite), montata sull'asse *O*. Le cose sono poi disposte in modo che questi portatori, settori o dischi, rotando nell'interno delle lamine più ampie *A* e *B* vengono successivamente a contatto con quattro molle metalliche *a*, *b*, *c*, *d*; delle quali le prime due comunicano coi conduttori *A* e *B* e fanno l'ufficio di molle collettrici, le altre comunicano fra di loro e servono ad altro fine, come ora vedremo.

I contatti durano per breve tratto; quello con le

molle collettrici avviene non appena i portatori P e Q entrano nell'interno degli induttori A e B, facendosi la rotazione di P e Q nel senso della freccia; il contatto invece con le altre due molle succede allorquando i portatori stanno per emergere dagli induttori suddetti.

Per intendere il giuoco della macchina, cominciamo a supporre che l'induttore A sia inizialmente carico di elettricità positiva per es., e che tutto il resto sia allo stato naturale; seguiamo il portatore P, poichè l'altro Q subisce in ogni istante azioni eguali e di segno contrario. Guardando la figura, si vede che esso è presentemente in contatto con la molla c, onde per l'influenza di A si caricherà negativamente; P verrà subito dopo, nella sua rotazione, a collocarsi nell'interno del conduttore B, al quale cederà quasi tutta la sua carica nel momento del contatto con la molla collettrice b: B dunque si elettrizzerà negativamente. Immediatamente dopo, il portatore P in discorso verrà nel suo movimento a toccare d, e acquisterà per influenza una carica positiva che cederà analogamente ad A, quando sarà venuto nel suo interno e toccherà la molla collettrice a; e così seguitando la rotazione del conduttore mobile P, si vede che andrà gradatamente aumentando, con la regola dell'interesse composto, tanto l'elettricità positiva di A quanto la negativa di B; e la differenza di potenziale aumenterà sino ad un certo limite massimo, che sarà raggiunto quando le scintille scoccheranno direttamente fra i due induttori; ovvero, se questi sono troppo distanti, finchè il guadagno e la perdita di carica dovuta a inevitabili dispersioni, non si compensino esattamente.

L'altro portatore Q agisce contemporaneamente allo stesso modo di P per accrescere la carica po-

sitiva di A e quella negativa di B; cosicchè il limite suddetto sarà raggiunto più prontamente.

È chiaro che moltiplicando le paia di portatori come P e Q, si aumenta la elettricità prodotta in ciascun giro.

Poniamo poi di fronte a ciascuna armatura A e B un pettine metallico, e uniamoli separatamente

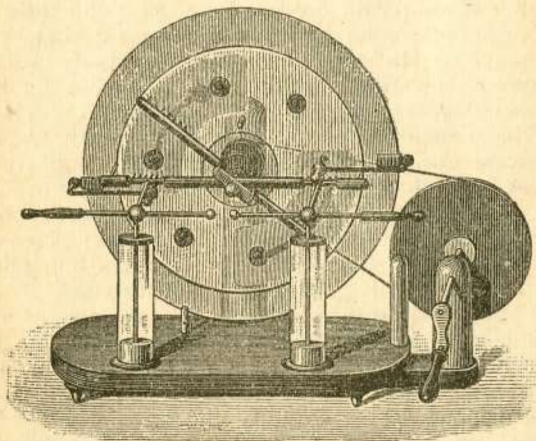


Fig. 352.

alle armature interne di due bottiglie di Leida disposte in cascata: facendo inoltre comunicare queste con le due palline isolate di uno spinterometro, come si vede nella fig. 352, si avrà fra esse una serie di scintille ben nodrite.

Ma affinchè la macchina possa funzionare regolarmente, è necessario che le cariche le quali restano sui due portatori P e Q dopo il loro con-

tatto con le molle collettrici *a* e *b*, siano minori di quelle acquistate per la influenza a contatto delle molle *c* e *d*; se così non fosse, la rotazione, sebbene fatta nel giusto senso, invece di accrescere, diminuirebbe le cariche degli induttori. Perchè tale in-

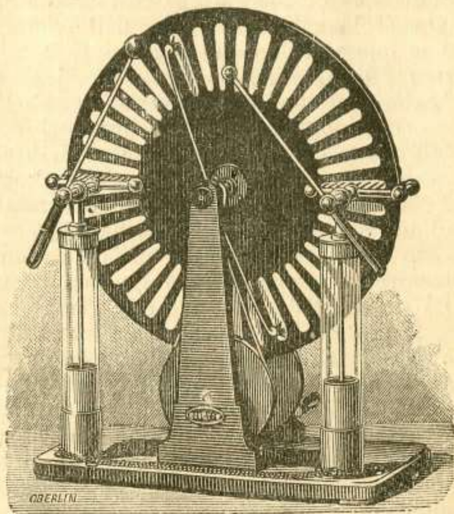


Fig. 353.

conveniente non abbia a verificarsi, gli induttori *A* e *B* devono avere tale curvatura, ad essere collocati in modo da racchiudere il meglio possibile nella loro concavità i portatori *P* e *Q*, al momento del contatto con le molle collettrici suddette.

Facendo invece ruotare *P* e *Q* nel verso contrario a quello ora detto, le cariche degli induttori *A* e *B* diminuirebbero, e la macchina non tarderebbe ad

estinguersi. Siccome poi il potenziale dei due conduttori è nella pratica quasi sempre leggermente diverso per dissimetrie chimiche, termiche o altro, così succede che la macchina con la rotazione si eccita da sè, senza bisogno della carica iniziale.

La produzione di energia elettrostatica è corrispondente al lavoro consumato nella rotazione, durante la quale si debbono vincere le forze elettriche tra gli induttori fissi A e B e i portatori P e Q, nelle varie fasi del processo.

La fig. 352 rappresenta la macchina del Voos, e la fig. 353 quella del Wimshurst, le quali, in ultima analisi, funzionano secondo i principi ora esposti.

318. **Energia di un conduttore elettrizzato.** — Ogni conduttore elettrizzato possiede dell'energia: infatti esso è capace di fornire una data somma di lavoro, allorchè venendo messo in comunicazione col suolo ritorna allo stato naturale. Tale energia, durante l'equilibrio elettrico, esiste allo stato potenziale; e in virtù del principio della conservazione dell'energia, essa è equivalente al lavoro speso per l'elettrizzazione. Per calcolare l'energia di un conduttore elettrizzato, bisogna dunque vedere qual'è il lavoro speso nell'elettrizzazione. Se gli si è comunicata una carica Q, il potenziale è andato gradatamente aumentando dal valore zero che aveva in principio sino al valore finale V; potremo ritenere pertanto che esso si sia mantenuto sempre, durante la elettrizzazione, al valore medio $\frac{V}{2}$, nel mentre vi si trasportava la carica Q; e in conseguenza il lavoro speso per la elettrizzazione, ovvero l'energia E acquistata dal conduttore è data da:

$$(1) \qquad E = \frac{1}{2} QV;$$

e poichè è $Q = C\,V$, sostituendo si ha:

$$(2) \qquad E = \frac{1}{2} C\,V^2,$$

od anche:

$$(3) \qquad E = \frac{Q^2}{2\,C}.$$

Si vede che l'energia di un conduttore elettrizzato di data capacità, è proporzionale al quadrato del potenziale o della carica.

Nella (1) misurando la carica in coulomb, il potenziale in volta, l'energia viene espressa in joule. Difatti 1 coulomb $= 3 \,.\, 10^9$ unità assolute, e 1 volta $= \frac{1}{300}$ unità assolute; cosicchè è chiaro che il prodotto di 1 coulomb per 1 volta equivale a 10^7 ergon, ossia a 1 joule.

319. **Misura dei potenziali con l'elettrometro.** — Quando un conduttore elettrizzato di forma qualunque è messo in comunicazione, col mezzo di un filo lungo e fine, con un elettroscopio posto a una conveniente distanza, in modo che questo sia sottratto ad ogni diretta influenza, la divergenza delle foglie d'oro, qualunque sia il punto toccato della superficie o dell'interno del conduttore, resta la stessa. È evidente che all'uopo bisogna aggiungere all'elettroscopio una scala che permetta di misurare la divergenza delle foglie. Se si raddoppia, si triplica la carica del conduttore, l'indicazione dell'istrumento corrisponde ad una carica doppia, tripla: la divergenza poi è sempre nulla per un corpo in comunicazione col suolo, soggetto o no all'influenza di corpi elettrizzati. Così l'indicazione dell'elettroscopio, impiegato come ora si è detto, è la stessa per tutti i punti di un conduttore in date

condizioni; essa è indipendente dalla grandezza e dal segno della carica nel punto toccato; caratterizza dunque uno stato particolare del corpo, che è il suo potenziale.

È poi chiaro che per dedurre dalla indicazione dell'istrumento il valore del potenziale, bisogna graduare l'istrumento: a tal fine è necessario di poter disporre di una serie di potenziali conosciuti mano a mano crescenti, che ci può esser fornita da una serie di elementi voltaici (fig. 387) o di piccoli accumulatori tutti eguali e diligentemente isolati. Messo a terra un estremo (per es. il polo negativo), si fa successivamente comunicare la pallina dell'elettroscopio col 10mo, 20mo, 30mo... elemento della serie, e si nota volta per volta la corrispondente divergenza delle foglie sulla scala dell'istrumento, Siccome il potenziale di ciascuna coppia è noto, ed esso cresce proporzionalmente al loro numero, si potrà formare una tavola delle divergenze e dei potenziali che vi corrispondono; od anche rappresentare il fenomeno col mezzo di un diagramma, nel quale le ascisse rappresentino, per esempio, le divergenze, e le ordinate i corrispondenti potenziali. Si controlla la misura, occorrendo, col mezzo di un *voltometro* ben graduato.

In altri elettroscopi v'ha una sola foglia, che è respinta dall'asticina conduttrice fissa che la sostiene. Simile a questi è l'*elettrometro di Braun* (fig. 354): un ago leggero può girare intorno a un piccolo asse portato da un conduttore piegato due volte ad angolo retto; il conduttore è fissato a un tappo di ebanite o di ambra nell'alto della cassa cilindrica dell'apparecchio, e risulta così perfettamente isolato. Il suo estremo inferiore porta una graduazione in *volta* ottenuta sperimentalmente. L'ago è sottratto all'influenza dei corpi esterni,

giacchè la cassa metallica fa da schermo; solo sul davanti questa ha un'apertura chiusa da una lastra di vetro, per leggere la posizione dell'indice sulla scala. Un tripode porta l'istrumento, e serve per regolarlo; quando è scarico, l'ago deve essere verticale e trovarsi dinanzi allo zero della sca-

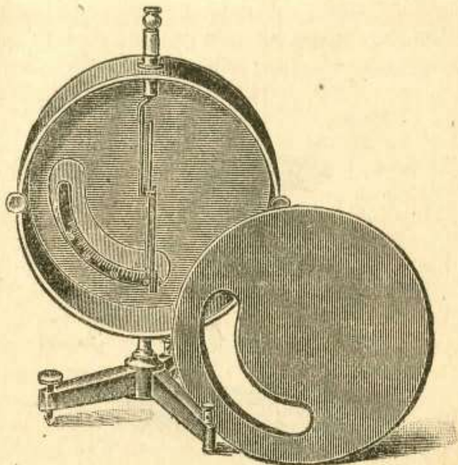


Fig. 354.

la: per lo più questa va da 0 a 4000 *volta*, ogni divisione valendo 100 *volta*. È uno strumento molto comodo.

320. **Elettroscopio condensatore.** — I condensatori (§ 322) non servono solo ad accumulare in conduttori di estensione relativamente piccola grandi cariche elettriche, ma servono anche negli strumenti di misura.

Quando si tratta di constatare deboli potenziali, alla sferetta dell'elettroscopio si sostituisce, come fece il Volta, un condensatore formato da due piatti metallici, verniciati di gommalacca sulle faccie che si guardano. Il piatto inferiore (fig. 355) comunica metallicamente con le foglie d'oro, il superiore è provvisto di manico isolante: a cagione del tenuissimo spessore del coibente, il condensatore così formato ha una notevole capacità; e trattandosi di deboli potenziali, non v'è pericolo che il coibente venga perforato dalla scarica.

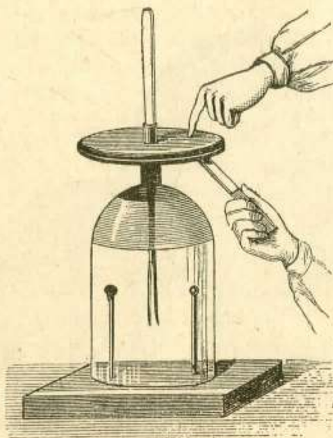


Fig. 355.

Si abbia ora una piccola sorgente di elettricità: poniamola a contatto del piatto inferiore, e facciamo intanto comunicare quello superiore col suolo. Supponiamo che il potenziale della sorgente, e quindi

delle foglie, sia così basso da non produrre la menoma divergenza di queste; ma se allontaneremo l'armatura superiore, la capacità del piatto inferiore viene ad un tratto a diminuire, e ne conseguirà un esaltamento del potenziale che produrrà la divergenza delle foglie.

Tale strumento ha servito al Volta per le celebri esperienze che lo condussero alla *scoperta della pila*.

321. **Elettrometro a quadranti.** — Invece dell'elettroscopio, si adoperano spesso per le misure

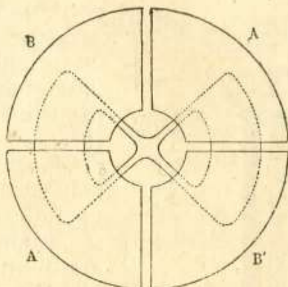


Fig. 356.

elettriche altri strumenti più precisi: per esempio, molto in uso è l'*elettrometro a quadranti* del Thomson (Lord Kelvin).

Esso si compone di due paia di quadranti metallici *AA' BB'* (fig. 356), posti in un medesimo piano orizzontale ed isolati con cura; i quadranti diagonalmente opposti poi sono riuniti fra loro per mezzo di fili conduttori.

Un leggero ago di alluminio avente la forma di un 8, è sospeso al disopra dei quadranti, nel loro mezzo e vicino ad essi; questo ago è por-

tato da un filo sottilissimo d'argento, come si vede nella fig. 357, che rappresenta l'istrumento nell'insieme. Per osservare le deviazioni, si unisce rigidamente all'ago uno specchietto piano, sul quale si dirige un fascio sottile di raggi luminosi facendoli passare attraverso ad una fenditura (figura 358); una lente convergente accoglie il fascio riflesso e proietta sopra una scala l'imagine della fenditura. Finchè l'ago non si sposta, l'imagine sulla scala sta ferma; quando poi l'ago devia, l'imagine si sposta di un angolo doppio. Un altro metodo consiste nell'osservare con un cannocchiale munito di reticolo l'imagine della scala riflessa dallo specchio, come indica la fig. 359.

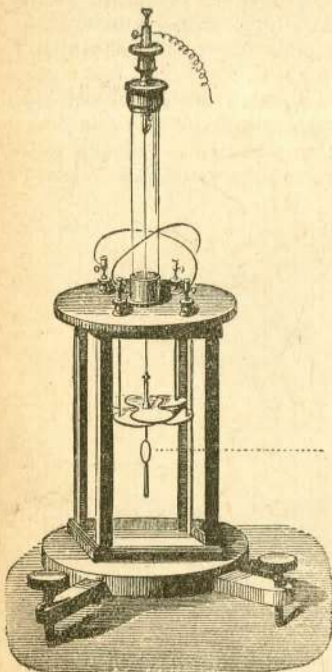


Fig. 357.

Ora si comunichi all'ago un potenziale piuttosto elevato, supponiamo positivo, riunendo il filo che lo sostiene al polo positivo di una pila, di un 100 a 200 elementi, di cui l'altro estremo sia a terra. I quadranti fatti comunicare fra di loro

e con la terra, si elettrizzeranno negativamente; ma se tutto è simmetrico, non si dovrà verificare alcuna deviazione dell'ago, perchè le forze elettriche tenderanno a produrre rotazioni eguali e contrarie. Se l'ago invece devia, si girerà la sospensione superiore, finchè la perfetta simmetria sia ottenuta. — Fatto questo, per misurare la differenza di potenziale di due conduttori, o di due punti, si isolano le due paia di quadranti, e si stabilisce per mezzo

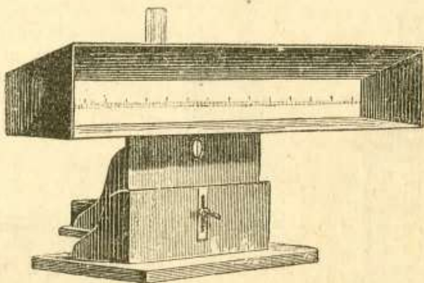


Fig. 358.

degli elettrodi di cui sono provveduti la loro comunicazione con i conduttori o i punti suddetti: l'ago positivo devierà e tenderà a portarsi verso quella coppia di quadranti di cui il livello elettrico è più basso; ma a siffatto spostamento farà equilibrio la reazione elastica dovuta alla torsione del filo, cosicchè l'ago assumerà, dopo qualche oscillazione, una nuova posizione stabile di equilibrio. La deviazione sarà tanto maggiore quanto più l'ago è vicino ai quadranti, e il suo potenziale è elevato: essa è sensibilmente proporzionale alla differenza di potenziale dei quadranti.

Si può usare l'istrumento anche in quest'altro modo: dati alle due paia di quadranti potenziali eguali e di segno contrario, riunendole ai due poli di una pila a corona di tazze del Volta (fig. 387), di cui il punto di mezzo è messo a terra, si fa comunicare l'ago con il conduttore di cui si vuol conoscere il potenziale. La deviazione è proporzionale a questo potenziale.

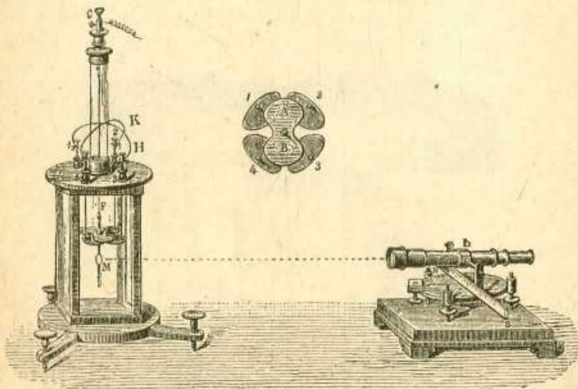


Fig. 359.

Bisogna proteggere l'istrumento dalle esterne influenze, il che si fa circondandolo con una custodia metallica provvista di opportune finestrine, ovvero con una rete metallica in buona comunicazione col suolo. Questa comunicazione è ottima, quando è stabilita per mezzo dei tubi del gas o dell'acqua potabile.

Una volta poi che di un conduttore si sia misurato il potenziale, se la sua capacità è conosciuta, se ne deduce subito il valore della carica.

322. **Condensatori elettrici.** — Deriva dalle formule del § 318 che, volendo accumulare in un conduttore una gran somma di energia potenziale elettrica, poichè praticamente il potenziale non può superare un certo limite, bisogna aumentare la capacità del conduttore stesso, come insegna la (2).

Servono a questo scopo i *condensatori*. Un condensatore elettrico ha, relativamente, grande capacità, sebbene le sue dimensioni siano piccole; la ragione è che la capacità elettrica di un conduttore, oltre che dipendere dalla estensione e dalla

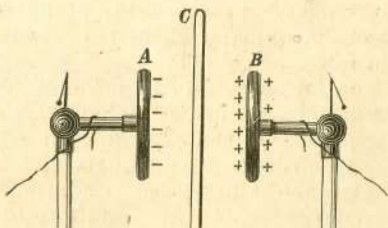


Fig. 360.

forma della sua superficie, dipende anche dai corpi che gli sono vicini. Sia, per esempio, un conduttore *B* (fig. 360) messo in comunicazione con una sorgente (macchina elettrica) che lo elettrizza sino ad un determinato potenziale: se allora si toglie la comunicazione con la macchina, e gli si avvicina un'altro conduttore *A* comunicante con il suolo, si constata che il potenziale di *B* diminuisce: per verificar ciò, basta far comunicare il conduttore *B* con un pendolino elettrico, o con qualche elettrometro. Ne viene che per riportare *B* al primo potenziale, occorre ristabilire la comunicazione con

la macchina, che gli fornirà una nuova quantità di elettricità. La capacità di B è dunque aumentata.

L'aumento di capacità che si ottiene avvicinando il conduttore non isolato A, cresce enormemente quando la distanza fra i due conduttori è molto piccola. Come è chiaro, il conduttore comunicante col suolo sarà elettrizzato per influenza in senso opposto a quello isolato, e la sua carica, in valore assoluto, sarà sensibilmente eguale a quella di quest'ultimo. Ma poichè tali cariche, e con esse le densità elettriche, sono grandi sulle faccie di fronte dei due conduttori, avverrebbe facilmente la scarica se fosse interposta soltanto aria; si ovvia a tale inconveniente sostituendo all'aria un isolante, come il vetro, la mica, ecc.

Un sistema formato così da due conduttori vicini, e separati da un coibente, si chiama *condensatore*; la sua capacità è quella assunta dal conduttore isolato; essa può superare centinaia di volte quella che competerebbe allo stesso conduttore quando fosse solo nello spazio. I due conduttori B e A sono detti le *armature* del condensatore. Non è necessario che una delle armature sia fatta comunicare col suolo; e però, indicando in generale con V_1 e V_2 i potenziali delle due armature, e con C la capacità del condensatore, la carica Q di un'armatura sarà data dalla relazione:

$$Q = C\,(V_1 - V_2).$$

La forma delle armature può variare; si fa però in modo che le loro superficie siano parallele e vicine. I condensatori hanno d'ordinario la forma di un quadro di Franklin, o di una bottiglia di Leida.

Il primo (fig. 361) consiste in una lastra di vetro, sulle cui faccie sono incollati due fogli di stagnola,

in modo da lasciare un buon margine di vetro scoperto tutto all'intorno: queste lamine formano le due armature. Per caricare il quadro, un'armatura si mette in comunicazione con il conduttore isolato della macchina, e l'altra con la terra per mezzo di un filo o di una catenella.

Il condensatore di Epino è anch'esso a faccie piane e parallele, ma i due piatti metallici (le armature) si possono avvicinare o allontanare (fig. 360): fra esse è interposta una lastra di vetro, che si può sostituire con altra di ebanite o di mica. Si carica come il quadro di Franklin.

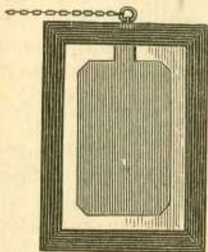


Fig. 361.

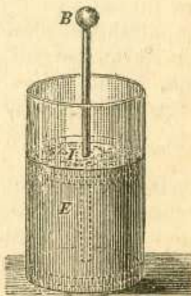


Fig. 362.

La bottiglia di Leida (fig. 362), ha la forma di una bottiglia o di un bicchiere: il coibente è il vetro, e le armature sono fogli di stagnola incollativi dentro e fuori, in modo da lasciare in cima un margine scoperto che si vernicia con gomma lacca, se si vuole che possano mantenersi a grande differenza di potenziale. Per la bocca della bottiglia passa un'asticciuola metallica, che è in buon contatto con l'armatura interna e termina in alto con un bottone sferico. Dopo quanto si è detto, è su-

perfluo aggiungere che per caricare una bottiglia di Leida si tiene in mano l'armatura esterna, e si mette il bottone in comunicazione col conduttore della macchina, od anche basterà accostarvelo in modo da tirarne delle scintille.

La capacità di un condensatore, oltre che dalle sue condizioni geometriche, dipende anche dalla natura del coibente interposto: questo difatti non ha il solo ufficio di impedire la scarica interna, ma prende parte attiva al fenomeno della influenza (§ 326). In generale si supponga un sistema di due lamine metalliche B e A delle quali una sia isolata e l'altra messa in comunicazione colla terra, e sia C la capacità del sistema, quando il mezzo interposto è l'aria. Se all'aria si sostituisce un altro coibente, come p. es. vetro, mica, paraffina, ecc., l'esperienza insegna che la capacità C_1 del sistema è maggiore di quella di prima; il rapporto $\frac{C_1}{C}$ è detto *potere induttore specifico* o anche *costante dielettrica* del coibente interposto. Ora, se l'effetto induttivo dipende dalla natura del coibente, detto anche dielettrico per la proprietà sua di trasmettere l'induzione elettrica, è logico pensare che l'azione si faccia nel dielettrico stesso e per suo mezzo.

Dichiareremo meglio più innanzi questo concetto, ora vogliamo dire come riunendo più condensatori, per esempio più bottiglie di Leida, nel modo che indica la fig. 363, vale a dire stabilendo la comunicazione metallica fra le loro armature interne e così pure fra le esterne, si viene a formare un condensatore unico la cui capacità è la somma delle capacità di tutte le bottiglie. Le armature interne si trovano tutte allo stesso potenziale V, e quelle esterne al potenziale zero: le bottiglie in tal modo disposte formano una batteria detta *in quan-*

tità o *in superficie;* essa si carica come una sola bottiglia, mettendo l'armatura interna isolata in comunicazione colla macchina elettrica e l'esterna in comunicazione col suolo. Gli effetti della scarica sono naturalmente più grandiosi.

Si ottiene invece una capacità minore di quella di un unico condensatore, disponendo le bottiglie

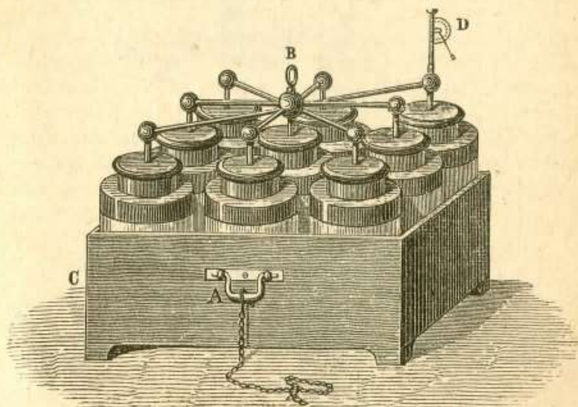


Fig. 363.

in *cascata,* come indica la fig. 364: ossia facendo comunicare l'armatura interna della prima colla sorgente elettrica e l'armatura esterna coll'interna della seconda, e così di seguito; l'armatura esterna poi dell'ultima colla terra. Con tale disposizione la differenza di potenziale tra il conduttore della macchina e il suolo si riparte egualmente tra le diverse bottiglie costituenti la serie, cosicchè si può disporre di potenziali assai elevati; mentre nel caso della

distribuzione in superficie, il vetro di ogni bottiglia sopporta tutta la differenza di potenziale, e questa

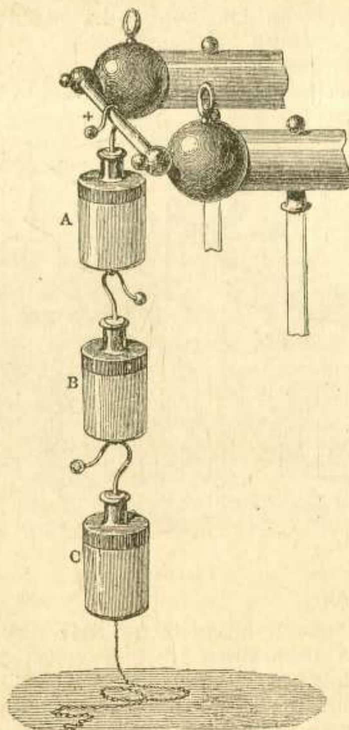


Fig. 364.

non può oltrepassare un certo limite, al di là del quale il dielettrico cede.

323. **Scariche dei condensatori.** — Diciamo ora dei diversi modi di scaricare un condensatore, per esempio una bottiglia di Leida: si può scaricarla a poco a poco, ovvero di un sol tratto.

La scarica lenta si ottiene isolando la bottiglia di Leida, e toccando alternativamente le due sue armature: si ottiene ciascuna volta una piccola scin-

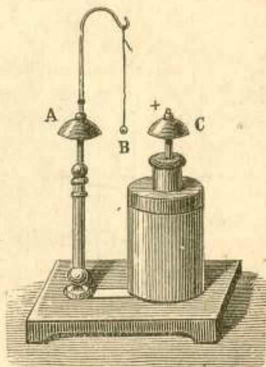


Fig. 365.

tilla. Si può rendere la cosa automatica, come indica la fig. 365: un piccolo conduttore *B* isolato, e mobile come un pendolo, è sospeso fra due timbri comunicanti ciascuno con una armatura; la pallina *B* obbedendo alle azioni elettriche, oscilla e scarica con una serie di piccole scintille la bottiglia: i due campanelli poi *A* e *C* danno luogo allo *scampanio elettrico*.

Un condensatore si scarica invece tutto d'un tratto, quasi interamente, quando si fa arco metallico fra le sue due armature: di solito si adopera

l'*eccitatore* (fig. 366), che è un arco metallico pieghevole con impugnature di vetro, toccando con una pallina dell'arco l'armatura esterna che si trova al potenziale zero, ed avvicinando l'altra pallina all'armatura interna; prima ancora che il contatto avvenga, scocca una viva e rumorosa scintilla.

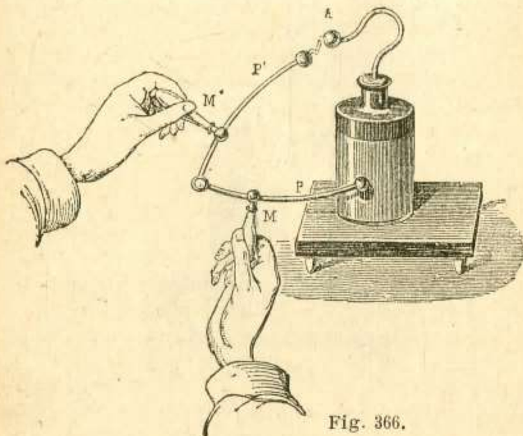


Fig. 366.

324. **Scariche residue.** — Dopo avere scaricato un condensatore, se lo si lascia a sè per breve tempo, facendo arco di nuovo fra le sue armature, si ottiene una nuova scintilla, minore però della prima; ripetendo la prova dopo un poco, si può ottenere un'altra piccola scintilla, e così di seguito sino a quattro o cinque. Sono queste le *scariche residue:* esse si spiegano riflettendo alle profonde modificazioni cui deve essere andato incontro il dielettrico, per le grandi differenze di potenziale

che ha sopportato durante la carica. Le modificazioni del dielettrico sono mostrate da dirette esperienze, fra le quali citeremo quella che consiste nel caricare, come fosse una bottiglia di Leida, un pallone di vetro pieno di acqua fino a un cannello sottilissimo con cui termina il collo, e tuffato nell'acqua. Durante la carica il menisco discende indicando aumento di volume, e ritorna nel punto primitivo nell'atto della scarica. Ora può accadere che il vetro non ritorni perfettamente alle condizioni primitive, quando avviene la scarica, ma si comporti come un corpo elastico: si sa che questo non riacquista subito la forma e il volume di prima al cessare della forza deformatrice; sulle prime resta alquanto deformato, e torna solo lentamente allo stato primitivo: analogamente il vetro d'un condensatore, riprendendo poco a poco il suo stato, fornirà le scariche secondarie.

325. **Misura della capacità di un condensatore.** — Col mezzo dell'elettrometro è agevole confrontare la capacità di un condensatore con quella di un altro assunto come campione; e se la capacità di questo è nota, si ha subito la capacità dell'altro. Supponiamo, per semplicità, che la capacità dell'elettrometro sia molto piccola rispetto a quella che si vuol misurare: ciò posto, si faccia comunicare il condensatore con l'elettrometro, e li si carichi a un potenziale V; poi si faccia comunicare il sistema col condensatore di capacità nota C, e si osservi il nuovo potenziale V' indicato dall'istrumento.

Chiamando x la capacità incognita del 1° condensatore, si ha evidentemente:

$$x V = (x + C) V'$$

da cui si dedurrà x.

Lo stesso metodo serve anche a trovare la capacità di un conduttore qualunque: per capacità nota si può, per esempio, prendere una sfera lontana da ogni altro conduttore, la capacità della quale è data dal suo raggio.

326. **Polarizzazione dei coibenti.** — Fu il celebre fisico Faraday che per primo rivolse l'attenzione sui coibenti, che fino allora erano stati considerati quali passivi isolatori; e si persuase che in essi, e non nei conduttori, i fenomeni elettrici hanno la loro sede principale. Si può con una esperienza dimostrare intanto che la carica risiede in massima parte non sulle armature metalliche, ma bensì nel coibente.

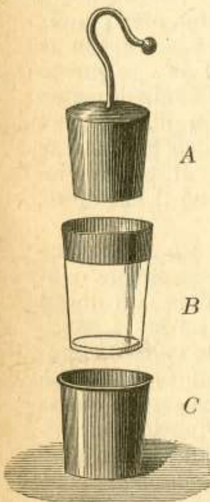


Fig. 367.

A tale scopo, nel bussolotto metallico *C* (fig. 367) entra esattamente il bicchiere di vetro *B*, e in questo il corpo metallico *A*.

Formata così la bottiglia, la si carica nel modo solito; poi la si mette sul tavolo, avendo cura di togliere l'armatura interna con un bastone di vetro o di ebanite: si toccano le parti metalliche e si scaricano di quel po' di elettricità che potessero avere; ricomposta di poi la bottiglia, e facendo arco al solito modo, si ottiene una bella scintilla. Questa esperienza fa, per così dire, toccare con mano che l'energia del condensatore risiede in realtà nel dielettrico. Ma se questo è vero pei condensatori, è naturale estendere le stesse considerazioni a tutti i fenomeni

elettrostatici in generale. Un condensatore difatti non è che un caso particolare di un sistema elettrostatico: si può per gradi piccoli, variando le distanze e modificando la forma e la estensione delle armature, passare ad un sistema di due conduttori qualunque senza modificare per nulla le condizioni fisiche del fenomeno.

Siamo dunque autorizzati fin d'ora a ritenere come cosa molto probabile che la sede dei fenomeni elettrici sia nei coibenti, e non nei conduttori; vale a dire, qualunque possano essere le cause dei fenomeni elettrostatici, esse si dovranno ricercare in condizioni speciali, non già dei conduttori, ma del mezzo dielettrico. Secondo questo ordine di idee, nello spazio che circonda un corpo elettrizzato debbono verificarsi delle deformazioni, dei cambiamenti speciali, in conseguenza dei quali accadono e si trasmettono le azioni elettriche, e nasce l'energia del campo. Intorno alla natura di queste deformazioni si possono soltanto fare delle ipotesi.

Una di esse, la più antica, è dovuta al fisico italiano Mossotti. Suppose egli che ogni mezzo dielettrico sia costituito da tante particelle conduttrici, ma isolate le une dalle altre, le quali nel campo che separa due conduttori elettrizzati qualunque A e B (fig. 368), si dispongono secondo la direzione della forza, e assumono alle due estremità cariche eguali in grandezza e contrarie di segno a quelle di A e B. Di modo che le molecole del dielettrico fra i due conduttori oppostamente elettrizzati formano una specie di catena, nella quale le cariche affacciate di due particelle contigue sono contrarie. Questo stato di cose si esprime dicendo che il dielettrico si *polarizza,* e mediante la polarizzazione la forza elettrica si propaga nel mezzo. Siccome poi è verosimile che un dielettrico differisca da un altro

pel numero, la forma, la disposizione delle particelle suddette, così è chiaro che due diversi dielettrici, sostituiti l'uno all'altro, modificheranno diversamente il campo elettrico, e competerà quindi a ciascuno una diversa costante dielettrica.

Di già il Matteucci aveva constatato che avvicinando a un corpo elettrizzato delle asticelle di zolfo allo stato naturale, esse acquistano uno stato elettrico di nome contrario all'influenzante nell'estremo più prossimo, e uno stato elettrico dello stesso nome nell'estremo più lontano, vale a dire

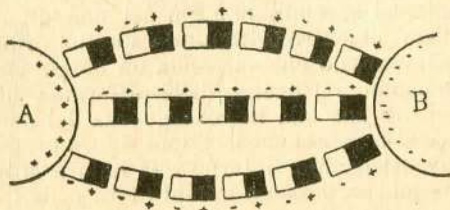


Fig. 368.

si polarizzano; e tale elettrizzazione non scompare allontanando le asticelle dal corpo influenzante come accadrebbe se esse fossero conduttrici; bensì la elettrizzazione persiste per un certo tempo.

Come dunque pensava il Faraday, le linee di forza non sono già concezioni puramente astratte, ma hanno una reale esistenza, e la loro direzione nel mezzo isolante coincide con quella della polarizzazione di questo, cioè delle linee secondo le quali si dispongono le cariche elettriche delle particelle conduttrici del dielettrico.

Questa ipotesi della polarizzazione elettrica dei corpi isolanti rende conto di molti fatti: se si segue una linea di forza nel dielettrico, si trovano

tanti atomi oppostamente elettrizzati nelle parti attigue. Tutti questi atomi devono dunque attrarsi reciprocamente, cosicchè ciascuna fila, e quindi le linee di forza tenderanno ad accorciarsi. Se invece si segue una superficie di livello, si troveranno tanti atomi aventi tutti carica positiva su una faccia della superficie, e carica negativa sulla faccia opposta, e perciò due qualunque di essi si respingeranno, ossia le linee di forza tenderanno ad allontanarsi lateralmente. Pertanto un isolante dovrà in un campo elettrico, allungarsi nelle direzioni trasversali alle linee di forza, ed accorciarsi secondo queste. Per esempio il vetro che separa le armature di un condensatore, dovrà diventare più sottile e più largo. Il primo fatto è dimostrato dall'esperienza che abbiamo riferito al § 324; il secondo pure è stato verificato, giacchè si è potuto constatare l'allungamento che subisce il vetro di un condensatore cilindrico.

Il Mossotti basandosi sulla detta ipotesi, fece la teoria matematica dei fenomeni elettrici; con essa però si ammettevano pur sempre azioni a distanza, dovendosi supporre le particelle conduttrici del dielettrico separate l'una dall'altra da un mezzo perfettamente isolante.

Maxwell seguendo le idee di Faraday che non ammetteva *azioni a distanza* e riteneva necessario un mezzo adatto alla trasmissione della forza fra corpo e corpo, concepì la polarizzazione in modo diverso. Egli immaginò il mezzo polarizzabile non più costituito da piccoli conduttori isolati, ma continuo; e nello stesso modo che, secondo le idee del Mossotti sulla polarizzazione, si supponeva uno spostamento di elettricità in ogni particella, Maxwell suppose che un simile spostamento abbia luogo, per azione della forza elettrica,

in ogni punto del mezzo, e per un piccolissimo intervallo. Si ammette inoltre che lo spostamento elettrico provochi nei dielettrici una modificazione, la quale, al pari delle deformazioni elastiche, sussista sotto l'azione della forza che produce lo spostamento stesso, vari e cessi insieme con questo.

Nella teoria del Maxwell si seguita dunque ad ammettere l'esistenza di un fluido elettrico o di qualche cosa di materiale cui si dá il nome di *elettricità*, ma non si ammettono azioni a distanza; il campo elettrico poi dovuto alla polarizzazione, non è altro che la manifestazione dell'elasticità del mezzo (dell'etere contenuto nel mezzo) messa in giuoco dallo spostamento elettrico, per cui lo stesso mezzo acquista una energia potenziale che non aveva prima della elettrizzazione. In via di imagine, possiamo rappresentarci il campo elettrico supponendo materializzati nel dielettrico le superficie di livello e i tubi di flusso (fig. 369), mediante membrane elastiche; il dielettrico risulta cosi diviso in tanti volumi elementari o piccolissime cellette che supporremo ripiene di un fluido incomprimibile.

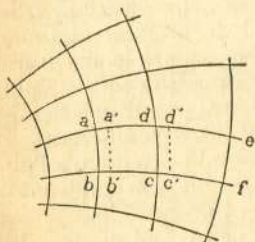


Fig. 369.

Il polarizzarsi del dielettrico consisterá, secondo il nostro modello, nello spostamento del fluido secondo i tubi di forza: con ciò parte del fluido di una celletta invaderá, deformando la ideata membrana, lo spazio occupato prima da parte del fluido della celletta che viene dopo; e le supposte membrane di separazione saranno deformate tutte nello stesso verso, dando origine a delle forze

reattive. Queste tendono a riportarle allo stato primitivo di equilibrio, e le riporteranno effettivamente non appena cesserà la causa della deformazione, ossia la causa che produce lo spostamento elettrico.

Se il dielettrico fosse perfettamente isolante, tali membrane resisterebbero a qualunque sforzo, cioè a qualunque spostamento; il che però non accade, perchè anche le pareti delle cellette così ideate nel dielettrico hanno un limite di elasticità, oltre il quale esse si rompono e la scarica attraversa il dielettrico. Nei conduttori invece tali membrane cederebbero continuamente al più piccolo sforzo dovuto allo spostamento, cosicchè l'elettricità può in essi muoversi liberamente, e mancando ogni reazione elastica non si può stabilire alcun campo elettrico.

Nella fig. 369 considerando la celletta $a\,b\,c\,d$ prima della deformazione, il fluido in essa contenuto va, dopo la deformazione, ad occupare il volume $a'\,b'\,c'\,d'$, onde si può dire che del fluido ha attraversato, nell'atto in cui si produce la polarizzazione, ogni sezione del tubo di forza $a\,b\,e\,f$. E può pure dirsi che ogni porzione di superficie di livello, nell'atto della polarizzazione, è attraversata da una certa quantità di elettricità. Più propriamente si chiama *spostamento elettrico* la quantità di elettricità spostata per ogni unità di superficie; e si ammette che esso risulti proporzionale in ciascun punto alla forza elettrica ivi agente. In seno all'aria, per una porzione qualunque di superficie equipotenziale compresa in un tubo di forza, lo spostamento ha lo stesso valore della carica elettrica q sulla porzione corrispondente della superficie conduttrice da cui parte il tubo; avrebbe invece il valore Kq in un altro dielettrico cui competa la costante K.

Nell'atto dello spostamento si ha dunque nel dielettrico un movimento di elettricità nel senso delle linee di forza, il quale durerà un tempo brevissimo a causa della reazione elastica del mezzo. Tale corrente è detta *corrente dielettrica* o di *spostamento*, per distinguerla dalla *corrente conduttiva* che si verifica nei conduttori. Quando poi cessa la causa che produce lo spostamento, la reazione elastica del mezzo produrrà una corrente dielettrica in senso contrario.

Nei conduttori non vi sono forze reattive; ma siccome ogni conduttore elettrizzato produce uno spostamento verso il mezzo circostante, le forze si manifestano in quest'ultimo. S'intende inoltre che ogni elettrizzazione è dovuta, in origine, ad uno spostamento conduttivo prodotto da una causa qualunque: finalmente il potenziale elettrico in un punto corrisponde, in questo modo di vedere, alla pressione del fluido che riempie la celletta elementare comprendente il punto considerato.

A chiarire viemmeglio le cose, vogliamo notare la stretta analogia, secondo questa teoria, tra le deformazioni e le forze in un corpo elastico, e le deformazioni e le forze elettriche in un dielettrico. Un corpo elastico si deforma quando con esso si trasmette una forza, e la deformazione dà origine a forze interne; analogamente un dielettrico che si trova in un campo elettrico, si deforma e la deformazione è accompagnata da forze reattive. Come poi in un corpo elastico deformato è accumulata dell'energia che viene restituita al cessare della deformazione, così in un campo elettrico l'energia viene restituita quando scompare la polarizzazione. Per esempio, nella carica di un condensatore, il dielettrico subisce una speciale deformazione; in questo e non nelle armature si accumula

l'energia; nella scarica scompare la deformazione del dielettrico, e questo restituisce l'energia che si era spesa per deformarlo.

L'analogia fra il contegno dei dielettrici e quello dei corpi elastici va anche più in là: se con azioni meccaniche si oltrepassa il limite di elasticità, il corpo si spezza o resta permanentemente deformato al cessare delle forze deformatrici; similmente, se la differenza di potenziale fra due conduttori, e quindi la forza elettrica, supera nel dielettrico un certo limite, il dielettrico cede e si lascia attraversare dalla scarica, oppure finisce col condurre l'elettricità. Il primo caso corrisponde alla rottura, il secondo alla plasticità.

E come non si hanno corpi perfettamente elastici, e si presentano fenomeni di elasticità susseguente per cui il ritorno alla forma primitiva si fa per gradi, così il dielettrico non restituisce talora l'energia tutta d'un tratto, ma fornisce scariche residue o susseguenti (§ 324).

327. **Scariche elettriche: scarica conduttiva.** — Descriviamo ora alcuni fenomeni prodotti dall'elettricità in movimento, dei quali il fondamentale è quello della scarica, il ritorno cioè di un conduttore elettrizzato allo stato naturale; ovvero, più in generale, ogni cangiamento dello stato elettrico di un sistema, per cui questo passa da uno stato di equilibrio a un altro.

La scarica può avvenire in diversi modi: abbiamo già detto (§ 315) che se si uniscono con un filo metallico due conduttori isolati, carichi a potenziale diverso, l'elettricità positiva passerà da quello di potenziale più alto a quello di potenziale più basso, e la corrente nel filo, rapidissima, durerà finchè l'equilibrio de' potenziali non sia raggiunto: il conduttore a potenziale più ele-

vato si sarà parzialmente scaricato su quello che era prima a potenziale più basso. Se invece si riunisce un conduttore elettrizzato alla terra, la scarica è completa, e il potenziale finale è nullo. Per ottenere una *corrente continua* fra due conduttori a potenziali diversi riuniti da un filo metallico, bisogna ad ogni istante rinnovare fra essi la primitiva differenza di potenziale; ciò accade, per esempio, riunendo con un filo metallico i due poli di una macchina a influenza. Questi modi di scarica costituiscono la *scarica conduttiva.*

328. **Scarica lenta. Ionizzazione dell'aria; ioni.** — La scarica di un conduttore isolato può accadere anche lentamente e silenziosamente pei sostegni, e attraverso all'aria che lo circonda. Tale dispersione dell'elettricità avviene perchè i sostegni, sebbene buoni isolanti, conducono sempre tal poco, e perchè lo stato elettrico si comunica altresì al pulviscolo atmosferico.

Ma la circostanza che più influisce sulla dispersione, è la *ionizzazione* dell'aria, per cui essa perde la sua coibenza e acquista un certo grado di conduttività. La ionizzazione di un gas consiste in una modificazione cui vanno soggette le sue molecole sotto l'azione di certi agenti, in modo che si creano atomi o gruppi d'atomi carichi positivamente *(ioni positivi)*, e atomi o gruppi d'atomi carichi negativamente *(ioni negativi)*. L'aria è sempre tal poco ionizzata, possiede cioè tali particelle elettrizzate quali positivamente e quali negativamente; ma la ionizzazione, e con essa il numero di tali particelle elettrizzate, cresce grandemente per effetto di certi raggi: sono raggi ionizzatori gli ultravioletti della luce solare e di alcune sorgenti artificiali di luce che li contengono in gran copia (luce elettrica, luce del magnesio, ecc.); i raggi

catodici e i raggi del Röntgen; quelli emessi dal radio e dagli altri corpi radioattivi; perfino un corpo incandescente qualunque è atto a ionizzare considerevolmente l'aria, Un'altra causa di ionizzazione consiste poi nell'urto de' ioni già esistenti contro le molecole neutre del gas: è questa che sopra tutto dà origine alle scariche elettriche. Ritorneremo in seguito su questo ordine di idee, qui ci basterà di averlo accennato.

Sotto l'influenza di un campo elettrico i ioni si muovono in un senso o nell'altro, secondo il segno della loro carica. Essi si spostano con una velocità finita, proporzionale al campo elettrico; nell'aria non è molto grande a cagione delle continue loro collisioni o con altri ioni o con molecole neutre. *La velocità acquistata in un campo di 1 volta per centimetro, misura la mobilità dei ioni.*

Se un gas ionizzato è abbandonato a sè stesso, la sua conducibilità sparisce a poco a poco, a cagione della ricombinazione delle cariche di segno contrario; i ioni di segno opposto esercitano difatti gli uni sugli altri un'attrazione elettrostatica, in virtù della quale tendono a far collisione; e se le condizioni dell'urto sono opportune, essi potranno combinarsi di nuovo e la conducibilità del gas diminuirà di altrettanto. Un'altra causa della diminuzione di conducibilità è la diffusione dei ioni verso le pareti conduttrici vicine, o altri corpi conduttori comunicanti con il suolo. Un fatto poi degno di nota è questo: i ioni negativi hanno una maggiore mobilità di quelli positivi; in ogni caso, nell'aria libera, la mobilità è piccola a cagione delle collissioni.

329. **Condensazione del vapore acqueo dovuta ai ioni.** — Diremo anche che i ioni godono della importante proprietà di servire da nuclei di conden-

sazione del vapore acqueo sovrassaturo. Se si produce una espansione rapida di un volume V_1 di vapor d'acqua saturo e privo di pulviscolo, indicando il volume finale con V_2, l'esperienza mostra che la condensazione del vapore non avviene che per valori del rapporto $\frac{V_2}{V_1}$ superiori a 1,4.

La condensazione si produce, al contrario, anche col valore 1,25 di detto rapporto, se il gas racchiude de' ioni negativi, e a partire dal valore 1,31 con ioni positivi.

Da questi fenomeni J. J. Thomson ha potuto calcolare la carica assoluta comune de' ioni positivi e negativi, che sarebbe eguale prossimamente a $3{,}4 \times 10^{-10}$ unità elettrostatiche C. G. S.

330. **Misura della ionizzazione dell'aria; risultati delle misure.** — La scarica lenta di un conduttore per effetto della presenza di ioni nell'aria si misura col mezzo di un elettroscopio, ed è molto usato quello di Elster e Geitel (fig. 370). Nell'interno di una scatola cilindrica di metallo, chiusa nella faccia anteriore da un vetro, si eleva dal fondo una lastrina rigida verticale e accuratamente isolata; ad essa in alto sono unite due foglioline leggerissime di alluminio, la cui divergenza può misurarsi su una scala unita all'istrumento. Per un foro che è nella parte superiore della scatola, col mezzo di una sonda munita di manico coibente si può dare alle foglie una carica: all'uopo riesce comodo l'uso di una pila a secco dello Zamboni.

Tolta la sonda che ha servito all'elettrizzazione e richiuso con un coperchietto il foro della scatola, la divergenza delle foglie può mantenersi qualche giorno, tanto è buono l'isolamento. Se sulla scarica dei conduttori elettrizzati influisse notevolmente la convezione dell'aria, come sino agli ultimi tempi si

pensava, è chiaro che non essendo tale convezione impedita nell'apparecchio, la scarica sulle pareti metalliche dovrebbe effettuarsi piuttosto rapidamente; ma siccome ciò non accade, è segno che la convezione dell'aria non ha grande influenza. Se si leva il coperchio, la scarica è un po' più ve-

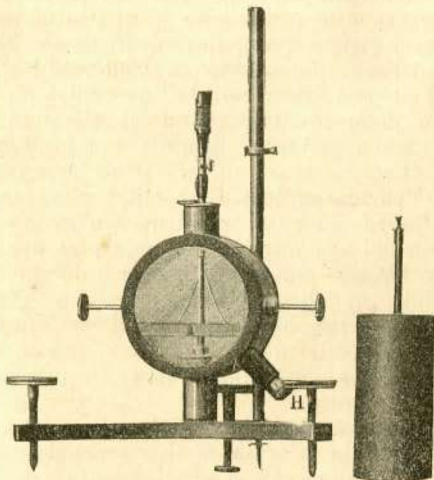


Fig. 370.

loce, ma sempre lentissima; le cose invece procedono ben altrimenti, se si unisce permanentemente al sistema isolante dell'asticina e delle foglie il cilindro *G* per mezzo del suo gambo; in questo caso, fatta la carica, si vede che le foglie cadono molto più velocemente: dopo 5^m di solito, sicuramente dopo 15^m, si nota una considerevole diminuzione nella loro divergenza. Ora sul cilindro *G*

si dirigono, perchè attratti, i ioni aventi carica contraria alla propria, e così esso viene scaricato.

I risultati di molte osservazioni fatte nelle diverse stagioni, in condizioni svariatissime di cielo, nelle valli e su gli alti monti, eseguite anche col mezzo di aerostati, si possono riassumere così: la dispersione elettrica ha un massimo nell'estate e un minimo nell'inverno; aumenta con l'altitudine; è maggiore a cielo sereno, minore in tempo di nebbia o con l'aria poco limpida. Nelle valli, in pianura, su piccole elevazioni, le due elettricità si disperdono quasi ugualmente; su gli alti monti però la elettricità negativa si disperde più rapidamente della positiva.

331. **Scarica esplosiva.** — Oltre alle forme di scarica finora descritte, un'altra ve n'ha che per il modo con cui si compie, si chiama *esplosiva*. Essa ha luogo fra due conduttori separati da un dielettrico solido, liquido, o gassoso, quando la differenza del loro potenziale ha raggiunto un certo limite: in tal caso il dielettrico già deformato per le azioni delle cariche, si squarcia, ed una scintilla scocca fra i due conduttori.

332. **Scariche oscillatorie.** — Per quanto si è detto innanzi, la scarica elettrica rappresenta un processo dinamico che si può comparare a quello di un corpo elastico deformato, nel quale venga a cessare la causa deformatrice; come in questo caso, anche la scarica elettrica può, in certi casi, assumere il carattere oscillatorio; il sistema elettrico cioè può tornare allo stato naturale, dopo che il valore del suo potenziale sia passato con rapide alternanze, da valori positivi a negativi, e viceversa. In ogni caso tali oscillazioni elettriche si estinguono rapidamente; difatti l'energia si trasforma parte in calore a cagione delle resistenze, e parte

si irradia nel mezzo circostante, in cui le oscillazioni si propagano sotto forma di onde; paragonabili alle onde luminose; per cui si può parlare di *radiazioni elettriche*, come si parla di *radiazioni luminose*: il telegrafo senza fili di Marconi utilizza codeste radiazioni elettriche.

333. **Distanza esplosiva.** — Si è detto in qual modo accade la scintilla fra due conduttori elettrizzati, de' quali uno può anche comunicare con il suolo: la lunghezza massima della scintilla, ossia la

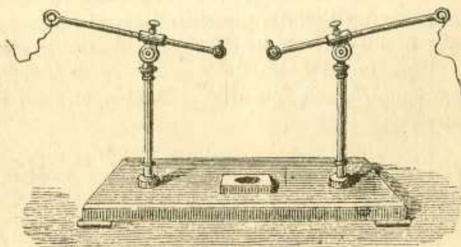


Fig. 371.

distanza alla quale la scintilla scocca fra i due conduttori quando sóno avvicinati lentamente, è detta *distanza esplosiva*.

Per lo più i conduttori fra i quali la scintilla scocca hanno la forma di sfere, portate da due bracciuoli isolati che possono avvicinarsi e allontanarsi con movimento micrometrico: così è formato lo *spinterometro*, simile a quello di cui sono provvedute le macchine elettriche di Voos e di Wimshurst.

La fig. 371 rappresenta uno spinterometro assai semplice. Le due sferette eccitatrici si fanno comunicare separatamente con i due conduttori che si

trovano a differente potenziale, per es. con le due armature di un condensatore. Si è trovato così che, entro certi limiti, vale a dire per distanze nè troppo grandi nè troppo piccole, la distanza esplosiva si conserva proporzionale alla differenza di potenziale delle sfere; ma a pari differenza di potenziale, la distanza esplosiva varia con le dimensioni, la forma e il segno elettrico de' conduttori: è una quistione molto complessa; certo è però che, aumentando gradatamente la differenza di potenziale, la lunghezza delle scintille cresce con ragione più rapida della semplice proporzionalità.

Questo è ciò che risulta dalla seguente tavola, che si riferisce al caso della scarica *nell'aria alla pressione ordinaria* fra due sferette eguali, di 1^{cm} di diametro:

Distanza tra le sfere in centimetri	Differenza di potenziale	
	in unità elettrost. C. G. S.	in volta
0.1	16.1	4830
0.5	56.3	16890
1.0	84.7	25440
1.5	97.8	29340
2	104.5	31350
3	124	37200
5	153	45900
10	187	56100
15	206	61800

331. **Varii aspetti della scarica elettrica: scintille, fiocchi, aureole.** — Studiamo ora nei particolari la scarica elettrica nell'aria, la quale può assumere forme assai varie a seconda della distanza, della differenza di potenziale, del mezzo, della capacità e della forma dei conduttori, ecc.

Se la distanza esplosiva è breve, la scarica avviene con una scintilla che consiste in un tratto luminoso, di diametro e di splendore uniformi in tutta la lunghezza (fig. 372), la cui larghezza aumenta con la quantità di elettricità. Con forti tensioni, si staccano e si arroventano anche le particelle metalliche degli elettrodi, come prova l'analisi spettroscopica.

A partire da una certa distanza che aumenta con la capacità dei conduttori, e quindi con la quantità

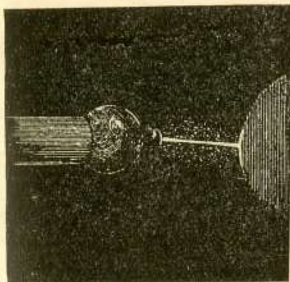


Fig. 372.

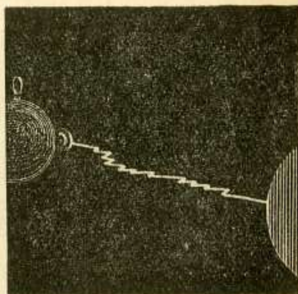


Fig. 373.

di elettricità impegnata in ciascuna scarica, la scintilla non è più rettilinea, ma forma una spezzata, come mostra la fig. 373 che rappresenta una scintilla tra il conduttore di una macchina elettrica e l'orlo di un disco comunicante con la terra. — Se la distanza aumenta ancora, la scintilla presenta una forma più complicata: essa lascia sfuggire lateralmente dei tratti luminosi che partono più specialmente dagli angoli, e si ramificano alla loro volta (fig. 374). Tali ramificazioni sono brillanti e d'un color bianco, come la stessa scintilla, alla lor

base; ma un po' lontano la luce è di un bleu violaceo, e il loro splendore s'indebolisce a poco a poco verso le estremità.

Le ramificazioni violacee indicano il passaggio della scintilla alla forma di *fiocchi* o *pennacchi*. Quando una macchina elettrica a induzione è in attività in una camera oscura, si vedono i fiocchi luminosi sul pettine positivo, e le stellette sul pettine negativo; anche le parti salienti dei conduttori mostrano questi effetti luminosi, e si ode un fruscio che richiama quello d'un getto di vapore. Abbiamo,

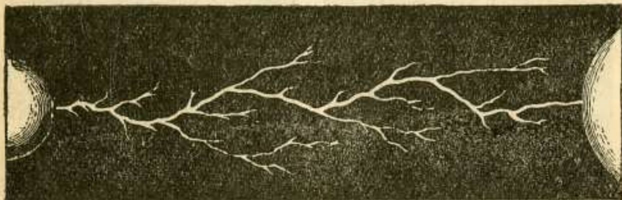


Fig. 374.

parlando del potere delle punte, descritto l'aspetto de' fiocchi e delle stellette (§ 313): qui ricorderemo che i primi sono formati generalmente da un peduncolo rettilineo assai brillante, che a partire da un certo punto si ramifica bruscamente in un gran numero di rami divergenti, di una tinta violacea meno viva; i rami si dividono poi a loro volta, e finiscono per estinguersi del tutto: le stellette invece mostrano una luce bianco-violetta, di estensione assai minore dei fiocchi, ma con innumerevoli rami.

I fiocchi si producono pure se al conduttore positivo di una macchina elettrica che termini con

una piccola sfera si avvicina un conduttore in comunicazione con la terra, ad una distanza un po' maggiore di quella esplosiva: la fig. 375 mostra uno di tali pennacchi, ottenuto tra la sferetta del conduttore di una macchina ordinaria a strofinio e l'orlo di un disco comunicante col suolo.

Se nell'arco scaricatore vi sono parecchie interruzioni, in ciascuna scocca una scintilla; tale è la ragione del luccichio dei quadri scintillanti, che si costruiscono attaccando su una lastra di

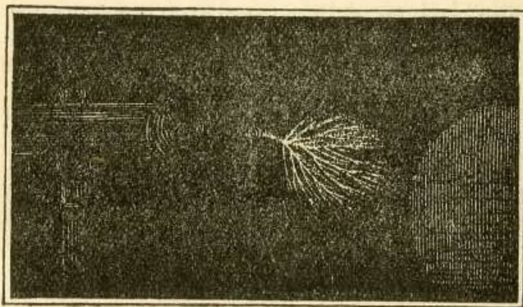


Fig. 375.

vetro con vernice isolante tante striscioline di stagnola, in modo da formare un disegno. Nell'atto della scarica la scintilla brilla simultaneamente in ogni interruzione, e riproduce per un istante il disegno del quadro. Questa esperienza serve probabilmente a spiegare la grande lunghezza di certi lampi, che altro non sono se non enormi scintille fra nubi oppostamente elettrizzate, e consistono spesso in una successione di scintille fra più nubi. Serve anche a mostrare la grandissima rapidità

con cui si propaga il disquilibrio elettrico: tuttavia, sebbene la scintilla sembri istantanea, tanto è di breve durata, in realtà essa è un fenomeno assai complesso che ora vogliamo un poco dichiarare.

La scarica di un condensatore, a seconda della sua capacità e della resistenza dell'arco eccitatore, può essere, come si è detto, *continua*, oppure *oscillatoria*. Nel primo caso, l'intensità della corrente di scarica cresce da zero a un massimo, per decrescere di nuovo a zero quando la scarica è finita. Nel secondo caso, l'arco eccitatore è la sede di correnti alternativamente di verso contrario che si succedono con rapidità grandissima, e diminuendo di intensità presto si spengono. La scarica di un condensatore può quindi rassomigliarsi al distendersi di una molla tesa: se questa incontra nel suo movimento una notevole resistenza, riprenderà la forma di prima senza oscillare; altrimenti, farà ciò dopo aver compiuto una serie di oscillazioni di ampiezza rapidamente decrescente.

Le due differenti maniere di scarica di un condensatore possono rendersi manifeste col metodo prima usato da Feddersen, osservando i diversi aspetti che assume l'imagine della scintilla in uno specchio piano, girante con una grande velocità intorno ad un asse parallelo alla stessa scintilla: si osserverà una striscia continua od oscillatoria. Anzi Feddersen, proiettando per mezzo di uno specchietto concavo la imagine della scintilla sopra una lastra sensibile, potè ottenerne la fotografia.

Queste stesse esperienze furono poi ripetute da varii fisici: la fig. 376 mostra due belle imagini fotografiche di scariche oscillatorie prodotte fra

elettrodi di cadmio, ottenute dai compianti professori Battelli e Magri. Poichè l'estremità positiva della scintilla è più luminosa di quella negativa, la fotografia prova che ciascuna estremità diventa alternativamente positiva e negativa, e che quindi la scarica è oscillante.

Noi non possiamo estenderci su questo argomento; ma riterremo, come il calcolo insegna, e l'esperienza conferma, che la scarica d'una ordinaria

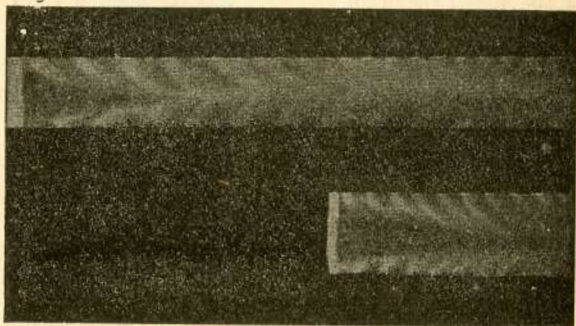


Fig. 376.

bottiglia di Leida, quando l'arco eccitatore è formato da un filo corto e grosso, è oscillatoria; riterremo cioè che essa si compone di una serie di scariche alternanti, rapidissime, il cui periodo dura meno di qualche milionesimo di secondo, ma che prestamente si spengono.

335. **Scarica nei gas rarefatti.** — Rarefacendo l'aria interposta fra le due sferette eccitatrici, la distanza esplosiva aumenta; o, ciò che è lo stesso, a provocare una scintilla di data lunghezza, occorre una differenza di potenziale minore. Per mostrare

questo fatto, basterà congiungere i due poli della macchina elettrica, da una parte alle due sferette *S* di uno spinterometro (fig. 377), dall'altra a due sferette *P*, *Q* chiuse in un lungo tubo di vetro, nel quale si possa praticare il vuoto, congiungendo il cannello *M* ad una macchina pneumatica. A mano a mano che la rarefazione dell'aria procede, si potranno sempre più avvicinare le sferette *S*, senza che per questo il tubo cessi di illuminarsi: quando la rarefazione è molto spinta così che l'aria residua non prema più di 2 o 3 mm. di mercurio, la sca-

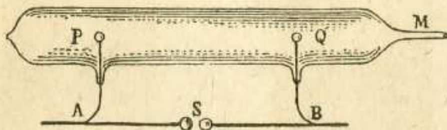


Fig. 377.

rica passa fra le due palline *P* e *Q* sebbene molto lontane, piuttosto che superare il piccolo spessore d'aria in *S*.

Bisogna però notare che v'ha una resistenza minima al passaggio della scarica, la quale corrisponde presso a poco alla rarefazione suddetta di 2 mm. di mercurio; spingendo più oltre la rarefazione, come può farsi con le pompe a mercurio, la resistenza invece di diminuire ancora, aumenta; si costruiscono tubi talmente vuoti che la scarica non vi può più passare.

La scarica nei gas rarefatti dà luogo a fenomeni luminosi assai attraenti e svariati, che non possiamo lasciar di descrivere brevemente. L'esperienza si fa di solito con l'uovo elettrico e con i tubi di Geissler.

L'uovo elettrico (fig. 378, 379) è un recipiente di vetro di forma ovoidale, nel quale si può rarefare l'aria col mezzo di una buona macchina pneumatica: vi penetrano a perfetta tenuta, a seconda dell'asse maggiore, due verghe di ottone termi-

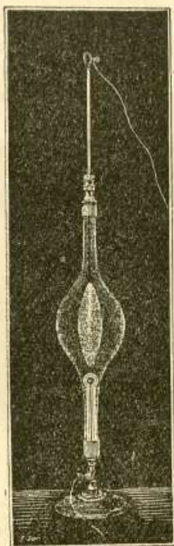


Fig. 378.

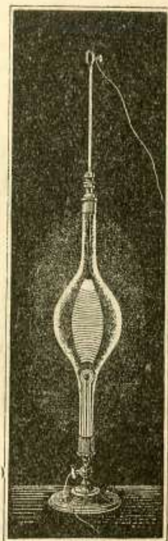


Fig. 379.

nate da sferette, la cui distanza è regolabile, perchè l'asticciuola superiore si può spinger dentro o ritirare all'infuori.

Finchè l'aria ha nell'interno la stessa densità che all'esterno, i fenomeni avvengono come fra le due sferette di uno spinterometro nell'aria libera;

ma appena essa sia abbastanza rarefatta, le scintille si trasformano in striscie di luce violacea che riuniscono le due palline, e corrispondono ad una serie di scariche.

Proseguendo nella rarefazione, le striscie si allargano e divengono sfumate; quindi il recipiente si riempie di un chiarore uniforme, e alla pressione di due millimetri circa, un flusso fusiforme di luce rossa si stende dalla pallina positiva alla negativa (fig. 378). Questa appare recinta da un'aureola

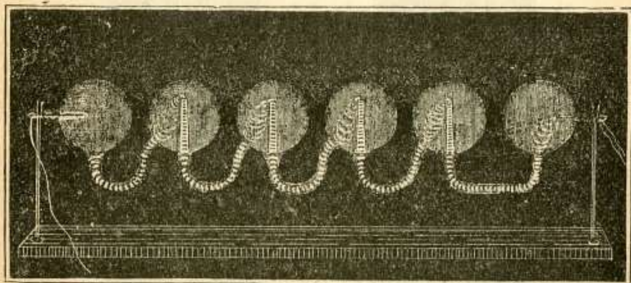


Fig. 380.

color lavanda, e le due luci sono separate da un intervallo oscuro che va ingrandendosi colla rarefazione, mentre si estende pure l'aureola che circonda il polo negativo. Spesso la luce è stratificata (fig. 379); la stratificazione si forma più facilmente, introducendo prima nel recipiente un po' di vapor d'etere o di essenza di trementina.

Bellissimi sono gli effetti che presentano i così detti *tubi di Geissler* (fig. 380). Sono cannelli di vetro di varia forma, terminati all'estremità da bolle cilindriche o sferiche, dove penetrano due

fili od elettrodi di platino. Questi tubi ermeticamente chiusi contengono aria o qualche altro gas, alla pressione di pochi millimetri di mercurio. Trasmettendo, per mezzo degli elettrodi suddetti, le scariche di una macchina a induzione in un simile tubo contenente aria, esso si illumina di una luce rosea; il colore varia con la natura del gas. L'elettrodo negativo è avviluppato anche qui da una aureola azzurra o violetta, separata con un intervallo oscuro dal resto del flusso luminoso; questo ha la forma di un filetto di luce stratificata, e parte dal polo positivo.

La luce di questi tubi è cremisi con l'idrogeno, rossa con l'azoto, bianco-violetta con l'ossigeno, biancastra con l'anidride carbonica. Si noti ancora che delle particelle metalliche vengono strappate dai fili, e proiettate contro le pareti delle bolle che li circondano. Questa luce è poi ricca dei raggi più rifrangibili ed è particolarmente atta ad eccitare la fosforescenza; si ottengono perciò dei magnifici effetti foggiando i cannelli con vetro di uranio, che ha una fluorescenza giallo-verdastra; o ponendo soluzioni di solfato di chinina, o d'altri liquidi fluorescenti, in tubi di vetro che circondano il cannello.

Della scarica nei tubi grandemente rarefatti si dirà in seguito.

336. **Effetti calorifici della scarica.** — Diciamo ora i diversi effetti delle scariche elettriche, e cominciamo da quelli calorifici. Quando si scarica un condensatore, la scintilla nell'aria è più o meno intensa, a seconda dell'arco scaricatore: è rumorosa e splendida se l'arco è un filo corto e grosso, e allora la scintilla assorbe la massima parte dell'energia disponibile; riesce invece pallida e meschina se l'arco eccitatore è fatto con un filo lungo e sottile, e in questo caso l'energia elettrica si tra-

sforma per la maggior parte in calore nel filo stesso. Qualunque siano i conduttori lungo i quali si effettua la scarica, essi oppongono sempre una certa resistenza al passaggio della elettricità, e una parte più o meno grande dell'energia disponibile, a cagione di questa resistenza, è trasformata in calore.

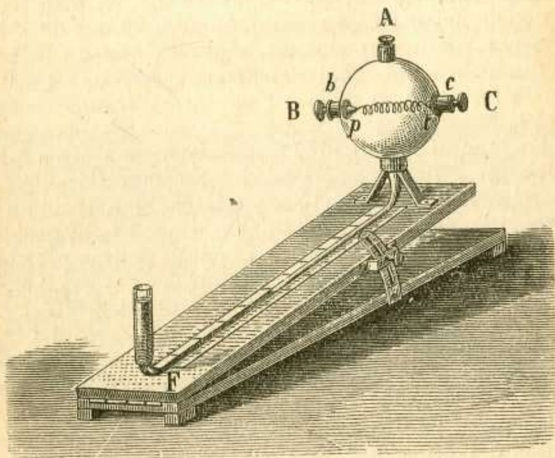


Fig. 381.

Si misura la quantità di calore svolta in una porzione qualunque del filo conduttore, col mezzo del termometro di Riess (fig. 381). La porzione del conduttore che si vuole studiare è rinchiusa in un pallone di vetro; questo inferiormente comunica con un cannello sottile alquanto inclinato e terminante in un tubo verticale più largo. Il cannello contiene un liquido (acido solforico mescolato con alcool), sino ad un certo punto della scala, come mostra la figura.

Quando la scarica di un condensatore passa pel lungo e sottile filo metallico *p t* piegato a spirale, il calore svolto si comunica subitamente all'aria del palloncino, la quale, aumentando così di forza elastica, fa spostare il menisco del liquido. Si può ritenere con buona approssimazione che lo spostamento sia proporzionale al calore svolto. Riess poi, misurando le cariche comunicate al condensatore, ha trovato che il calore svolto nel filo è in ogni caso proporzionale al quadrato della quantità di elettricità che vi passa, come vuole appunto la (3) del § 318.

Ma non conviene perdere di vista che non tutta l'energia disponibile si trasforma in calore nel termometro; una parte si manifesta nella scintilla o nelle scintille che si formano ad ogni interruzione dell'arco scaricatore, una parte minore si impiega a riscaldare il coibente del condensatore e in quelle frangie che, nel momento della scarica, si formano sull'orlo del condensatore; tali frangie, viste nell'oscurità, rassomigliano a lingue di fuoco che si elevano, verso l'orlo, dalle due armature.

Si mostra facilmente il calore della scintilla, facendo passare la scarica di una bottiglia di Leida attraverso all'etere contenuto in una coppa metallica, comunicante col suolo; l'etere subito si accende. Per accendere la polvere pirica, bisogna rallentare la scarica, inserendo nell'arco un tratto poco conduttore, come, per es., una funicella bagnata; se non si prende questa precauzione, la polvere viene proiettata, e non si accende. L'accensione delle materie infiammabili è da assegnarsi all'alta temperatura della scintilla; oggi si vendono degli *accendi-gas* comodissimi, che consistono in piccoli *replenisher* chiusi in astucci di ebanite; premendo una molla, si producono all'estremità

dell'apparecchio delle scintilline sufficienti ad accendere il gas d'illuminazione.

Tornando al calore promosso dalla scarica in un filo metallico, se essa è forte, potrà accadere che il filo si fonda e perfino si volatilizzi. Si fa bene l'esperienza mettendo un filo sottile fra le due sferette di uno spinterometro. Se si adopera una lastrina da specchio, a cui sia stata previamente tolta la vernice con un solvente, il velo d'argento o l'amalgama si volatilizzano rapidamente anche con una scarica mediocre.

L'esplosione della scintilla e quella che d'ordinario accompagna la volatilizzazione dei metalli, è il segno di una violenta agitazione dell'aria. Se l'esperienza si fa nell'acqua, immergendo in un bicchiere le due estremità dell'eccitatore che portano il filo, quest'urto in un fluido così poco comprimibile spezza con fracasso il vetro, imitando l'effetto delle torpedini.

La scintilla si può farla scoccare anche nei liquidi coibenti, come per es. olio di vaselina, avendo cura d'interrompere l'arco scaricatore nell'aria: essa è molto rumorosa, proietta i liquidi a distanza, e talora spezza anche il recipiente. Se il liquido è infiammabile, prende facilmente fuoco.

337. **Passaggio della scarica attraverso a corpi cattivi conduttori: effetti meccanici.** — Se la scarica è costretta ad attraversare un corpo cattivo conduttore, la sua energia si consuma in gran parte nel romperlo. Essa fora un cartoncino, una lastra di vetro; manda in ischegge un pezzo di legno secco. Si può forare un cartoncino con una piccola scarica mediante il foracarta (fig. 382); essa passa fra le due punte che toccano il cartoncino sulle due faccie opposte: è da notare che ove le due punte non si corrispondano esattamente, il foro si

fa più vicino alla punta negativa. In ogni caso il foro presenta gli orli rilevati su ambe le faccie, come se la forza che l'ha prodotto fosse partita dal mezzo del cartoncino verso le due superficie.

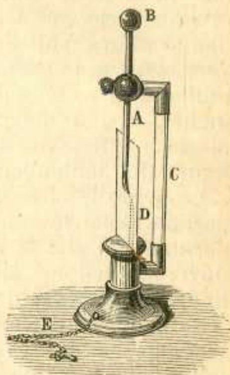


Fig. 382.

Il cartoncino è un corpo semiconduttore: il vetro invece isola bene, come si sa; ma si riesce, sebbene più difficilmente, a forarlo. La maggiore difficoltà dell'esperienza consiste a impedire alla scintilla di strisciare sulla superficie della lastra. Vi si riesce attaccando con mastice di colofonia e di trementina la lastra *L L* alla base piana d'un grosso cilindro di vetro o di ebanite, secondo l'asse del quale si trova impegnata un'asticella metallica terminata in una punta (fig. 383). Di rimpetto a questa se ne mette un'altra, od anche semplicemente

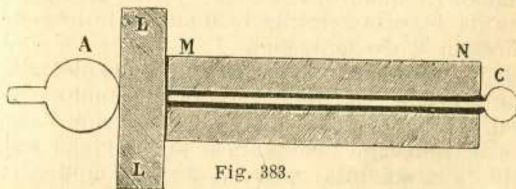


Fig. 383.

una sfera; facendo scoccare la scintilla, questa allora attraversa il vetro e vi fa un piccolo foro. Con grandi differenze di potenziale si possono forare lastre di parecchi centimetri di spessore.

Si è detto che se si tenta di forare il vetro frapponendolo semplicemente fra due punte o fra le due branche di un eccitatore, la scarica, anzichè attraversarlo, serpeggia alla sua superficie; soffiando allora sulle due faccie della lastra le polveri elettroscopiche, apparirà una stella gialla ramificata di zolfo sulla faccia elettrizzata positivamente, e una macchia rossa di minio sull' altra faccia elettrizzata negativamente. Sono queste le figure di Lichtenberg.

Le scintille che così si propagano lungo la superficie della lastra, vi lasciano anche una traccia permanente che si può mettere in evidenza alitandovi: si vedono allora dei disegni analoghi alle figure del Moser, dette *figure roriche.*

Se sulla superficie di una lastra di vetro si attaccano con una vernice de' grani di limatura metallica, la scintilla che vi striscia, si ramifica e produce degli effetti bellissimi. Si hanno quadri di Franklin, di cui l' armatura che si fa comunicare con il suolo, è formata con queste particelle conduttrici, e l'armatura isolata si prolunga con una striscia di stagnola a poca distanza dalla prima: caricando il quadro, esso si scarica di tratto in tratto da sè, e la scintilla lo illumina tutto ramificandosi in modo fantastico.

338. **Azioni chimiche delle scariche elettriche.** — Le scariche elettriche producono inoltre delle azioni chimiche; delle quali alcune, come l'esplosione dei miscugli detonanti, sono effetto del calore svolto dalla scintilla; altre, come la combinazione dell'ossigeno e dell' azoto secchi, sono una diretta trasformazione della energia potenziale elettrica in energia potenziale atomica.

L'esplosione dei miscugli detonanti, come quello di idrogeno e di ossigeno, si ottiene per mezzo

della scintilla nell'*eudiometro* e nella *pistola di Volta*.

Consiste questa in un recipiente metallico, in una tubatura laterale del quale passa un conduttore *DE* isolato dalla parete (fig. 384); dopo aver riempiuto il vaso del miscuglio esplosivo, lo si chiude col tappo di sughero *B*, e si accosta il bottone *D* al conduttore di una macchina elettrica. Quando scocca la scintilla tra il conduttore e la sfera *D* all'esterno, scocca pure fra l'estremo *E* e la parete della pistola nell'interno, determinando l'esplosione e l'espulsione violenta del tappo.

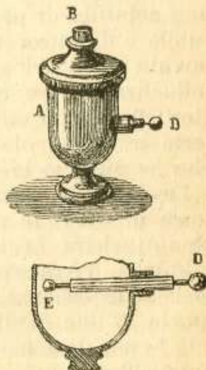


Fig. 384.

Il passaggio dell'elettricità, anche senza la forma di scintilla, produce ben altre azioni chimiche che diremo in seguito: ora non bisogna dimenticare che i fiocchi e gli effluvii elettrici trasformano l'ossigeno in ozono, il quale si manifesta all'odore particolare di fosforo, perchè appunto si svolge dell'ozono in vicinanza del fosforo umido. L'ozono è una modificazione polimera dell'ossigeno; si suppone cioè che la sua molecola sia formata di tre atomi invece che di due. Esso presenta tutti i fenomeni di ossidazione del cloro; in grande copia riesce dannoso alla respirazione, ma nei luoghi rigogliosi di vegetazione, dove si produce in moderata quantità, comunica all'aria proprietà vivificanti.

L'ozono, ad una temperatura relativamente alta, si scompone, cosicchè per la sua produzione sono più efficaci i fiocchi che le scintille.

339. **Azioni fisiologiche.** — Abbiamo già notato che il nostro corpo, quando fa parte del circuito di scarica, prova una commozione: questa può andare da una semplice scossa alla folgorazione.

L'esperienza dimostra che l'effetto dipende dall'energia della scarica: così, mentre impunemente si può tirare da una macchina elettrica ordinaria una scintilla di parecchi centimetri, riesce intollerabile e dannosa una scintilla di pochi millimetri dovuta alla scarica di un condensatore. E ha grande influenza sul fenomeno anche la durata della scarica: l'effetto è minore, se la scarica di una batteria avviene col mezzo di una funicella bagnata che ne allunga la durata.

Le deboli correnti possono, in certi casi, restituire ai nervi il vigore e reintegrare la loro funzione turbata da malattie. Quanto poi alle scariche fulminee, d'Arsonval ha stabilito in seguito a numerose esperienze, che l'elettricità può produrre la morte in due modi diversi:

1° per lesione o distruzione degli organi, dovuta all'effetto esplosivo od elettrolitico della scarica;

2° per eccitazione dei centri nervosi, la quale produce l'arresto della respirazione e la sincope, ma senza lesione degli organi.

Nel primo caso la morte è definitiva; nel secondo invece può essere apparente, e si riesce talvolta a richiamare il fulminato alla vita ricorrendo alla respirazione artificiale. Questa bisogna praticarla subito, come si fa con gli asfitici, per ottenere possibilmente che i polmoni tornino a funzionare.

CAPITOLO XI.

Corrente elettrica.

340. **Pila elettrica.** — Se si fanno comunicare, col mezzo di un filo metallico, due conduttori carichi a diverso potenziale, sappiamo che avviene una scarica, vale a dire un rapido passaggio di elettricità dal conduttore di potenziale più alto a quello di potenziale più basso, finchè si sia egualiato il potenziale sui due conduttori; il risultato è una diminuzione dell'energia elettrostatica del sistema. Se ora si imagina che, in virtù di una causa qualsiasi, si riproduca incessantemente, a intervalli di tempo infinitamente piccoli, la primitiva differenza di potenziale, si otterrà una successione di scariche, ossia una trasmissione continua di elettricità o *corrente elettrica permanente.*

Vedremo subito che la *pila* del Volta è un apparecchio atto a stabilire e mantenere una differenza di potenziale fra due conduttori.

È noto che il Volta arrivò a scoprire il meraviglioso suo apparecchio studiando e discutendo la celebre esperienza del Galvani, professore nell'Università di Bologna, sulle contrazioni della rana. Questo sapiente scienziato, sperimentando l'azione della elettricità negli organismi viventi, fu condotto a scoprire (an. 1786) che ogni qual volta i nervi

crurali di una rana scorticata e morta di fresco vengano fatti comunicare metallicamente coi muscoli di una gamba (fig. 385), la rana si contrae fortemente. Galvani interpretò il fatto ammettendo che esisteva una elettricità propria della rana e in generale di tutti gli animali, che chiamò *fluido*

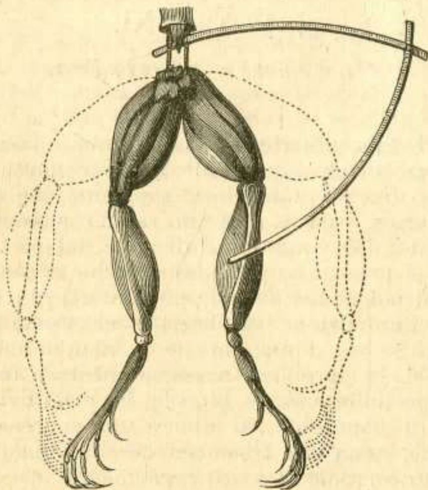


Fig. 385.

nervoso; e considerò il corpo degli animali come una vera e propria bottiglia di Leida che si carica spontaneamente per il fenomeno della vita, le cui armature sono formate dai nervi e dai muscoli. Nella esperienza suddetta, secondo Lui, l'arco metallico fungeva da eccitatore soltanto; e la rana, oltre che fornire il condensatore, faceva anche la parte di elettroscopio.

Ma Volta notando che per la buona riuscita dell'esperienza era necessario ricorrere ad un arco di due metalli (per esempio rame e zinco), — il che, a vero dire, aveva pure osservato il Galvani, — pensò che l'elettricità non fosse di origine animale, come il Galvani credeva, ma avesse origine nel contatto de' due metalli, e la rana non facesse che la parte passiva di elettroscopio. Vale a dire, il Volta ammise che nel contatto di due metalli prenda origine un disquilibrio elettrico (differenza di potenziale), per cui un metallo diviene positivo e l'altro negativo.

Non possiamo qui riferire la bella e gloriosa contesa tra il Galvani ed il Volta, nè le esperienze che condussero quest'ultimo al principio che porta il suo nome, e che può enunciarsi così: *Il contatto di due metalli, e generalmente di due corpi eterogenei qualunque, basta a stabilire fra essi una differenza di potenziale che dipende solamente dalla natura dei corpi e dalla temperatura, ed è indipendente dalle loro dimensioni, dalla estensione delle superficie in contatto e dal valore assoluto del potenziale su ciascuno di essi.*

La differenza di potenziale così generata si prende come misura della *forza elettromotrice* che si immagina agente nel contatto, e che determina siffatta differenza di potenziale.

Fra le numerose esperienze ideate dal Volta per mettere in evidenza questo principio, noi citeremo le due seguenti. Prendasi in mano una laminetta di zinco *Zn* saldata ad una simile di rame *Cu*, e si metta quest'ultima in comunicazione col piatto inferiore dell'elettroscopio condensatore, l'altro piatto comunicando col suolo (fig. 386). Le foglie d'oro non divergeranno, perchè è piccolissima la differenza di potenziale che nasce nel contatto di

due metalli; ma se si sopprime il contatto col piatto inferiore e si solleva quello superiore, le foglie d'oro si aprono, e si constata che sono elettrizzate negativamente. Ciò prova che il potenziale del rame è negativo, mentre quello dello zinco, tenuto in mano, è uguale a zero.

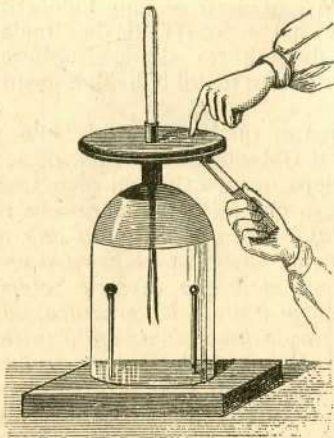


Fig. 386.

Se si ripete l'esperimento tenendo in mano invece il rame e toccando il piatto inferiore con lo zinco, le foglie restano immobili. La caduta del potenziale, andando dallo zinco al rame, è evidentemente la stessa da una parte e dall'altra poichè lo zinco si trova fra due rami, e il potenziale del piatto è nullo come quello della lamina di rame che si tiene in mano. Volendo pertanto che il piatto inferiore si carichi positivamente, è d'uopo che esso non tocchi

direttamente lo zinco affinchè in questo contatto non si generi la differenza di potenziale opposta, e che tuttavia comunichi con lo zinco affinchè l'elettricità positiva possa trasmettersi. Si riesce nell'intento rivestendo la laminetta di zinco con carta o con panno bagnati; se si fa la prova a questo modo, tenendo in mano il rame e toccando il piatto inferiore col foglio bagnato che copre lo zinco, le foglie divergono infatti di elettricità positiva quando si allontana il piatto superiore.

È vero che con ciò si aggiungono due nuovi contatti tra il rame del piatto del condensatore e la carta bagnata, e tra questa e lo zinco; ma la differenza di potenziale che così si produce, è, secondo il Volta, di una grandezza punto paragonabile a quella che ha sede nella giuntura dei due metalli: vale a dire, la carta o il panno bagnato in questa esperienza avrebbero fatto più l'ufficio di *conduttori* che di *elettromotori.* E in vero egli notò che i conduttori liquidi, come l'acqua, le soluzioni acide e saline, godono di tale proprietà; e però distinse i corpi in *conduttori di prima classe* o *perfetti elettromotori* come i metalli, le leghe, alcuni ossidi e solfuri metallici, il carbone; ed in *conduttori di seconda classe* o *imperfetti elettromotori* come l'acqua, le soluzioni acide e saline, in generale gli elettroliti.

Il Volta di poi, per mezzo di numerose esperienze, stabilì che se si forma una catena di metalli a temperatura uniforme, la differenza di potenziale agli estremi è quale sarebbe se questi fossero a immediato contatto. Questa legge è detta *legge delle tensioni di Volta*, volendosi colla parola tensione nient'altro significare che differenza di potenziale.

Siano $A, B, C \dots N$ i metalli della catena: se indichiamo con il simbolo L/M la forza elettromotrice o differenza di potenziale fra due metalli qualunque

della serie a immediato contatto, la quale dipende unicamente, come si è detto, dalla loro natura, la legge delle tensioni si può esprimere così:

$$A/B + B/C + C/D .... + M/N = A/N.$$

Ora poichè evidentemente è:

$$-A/N = N/A,$$

ne viene che

$$A/B + B/C + ... + M/N + N/A = O$$

ossia, *in un circuito chiuso formato esclusivamente da metalli alla stessa temperatura, la forza elettromotrice risultante è nulla, qualunque siano le forze elettromotrici attive in ciascun contatto; e però in un tale circuito non può stabilirsi alcuna corrente.* Deriva ancora dalla legge suddetta che la differenza di potenziale fra una lastra di rame e una di zinco saldate insieme con stagno o con una lega qualsiasi, è la stessa che se esse fossero a immediato contatto; e si deduce pure che se i due metalli che terminano la catena sono identici, le due estremità sono allo stesso potenziale.

Oltre ai metalli e le leghe, anche gli altri corpi appartenenti ai conduttori della 1ª classe obbediscono alla predetta legge: invece i conduttori della 2ª classe (elettroliti) non ubbidiscono a questa legge. Cosicchè, se a far parte della catena entrano anche conduttori della seconda classe, come sarebbe, per esempio, una catena formata di rame, acqua acidulata con acido solforico, zinco e rame, si constata che i due rami estremi sono a differente potenziale: la serie di corpi ora detta forma una *coppia voltaica.* La differenza di potenziale così constatata agli estremi, risulta dalla *somma algebrica* di quelle

che esistono nei tre successivi contatti, rame e acqua acidulata, acqua acidulata e zinco, zinco e rame.

Invece di una semplice coppia di Volta, se ne possono disporre parecchie in fila, con orientazione costante come nella fig. 387. Si ha così la *pila a corona di tazze;* sono tanti vasi contenenti acqua acidulata, i quali comunicano tra di loro per mezzo di archi metallici di zinco e di rame, in modo che in ciascun vaso peschino le estremità eterogenee di due archi consecutivi. Si accresce così la differenza di potenziale tra gli estremi della pila o *poli.*

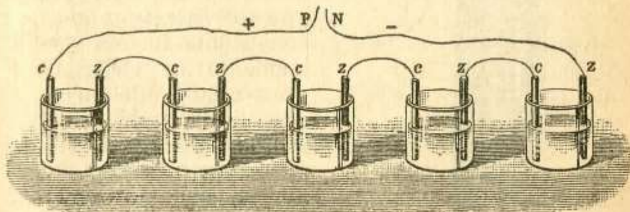


Fig. 387.

Questa pila è molto più comoda di quella *originaria* a colonna (fig. 388), nella quale le singole coppie sono formate da dischi di rame saldati con dischi di zinco, tutti orientati nel medesimo verso, e separati da altrettante rotelle di panno inzuppato di acqua leggermente acidulata. La serie de' corpi e de' contatti è la stessa di quella della pila a corona di tazze, e però le considerazioni sono le medesime.

Congiungiamo con ciascuno dei poli un filo di rame, *reoforo positivo* e *reoforo negativo.* Il reoforo positivo è quello unito alla lastrina di rame che pesca nel liquido, il reoforo negativo è quello unito

allo zinco. Se i due reofori non si toccano, la pila è a *circuito aperto,* e alle loro estremità non si osservano che i fenomeni elettrostatici, dovuti al campo prodotto dalla differenza di potenziale. Se per mezzo dei detti reofori si mettono i poli della pila in comunicazione colle armature di un condensatore, l'equilibrio è rotto, e avviene una *corrente istantanea,* consistente in uno spostamento di elettricità attraverso il dielettrico, secondo la direzione della forza elettrica. Tale spostamento cesserà non appena si sarà verificato l'equilibrio fra la detta forza e la reazione del dielettrico; la qual cosa succede in un tempo sempre assai breve, che non dura più di una piccola frazione di secondo. Allora il condensatore è carico, e le sue armature acquistano una differenza di potenziale eguale alla forza elettromotrice della pila. Nella scarica poi, è la reazione del dielettrico che sospinge indietro la elettricità, per l'arco che congiunge le due arma-

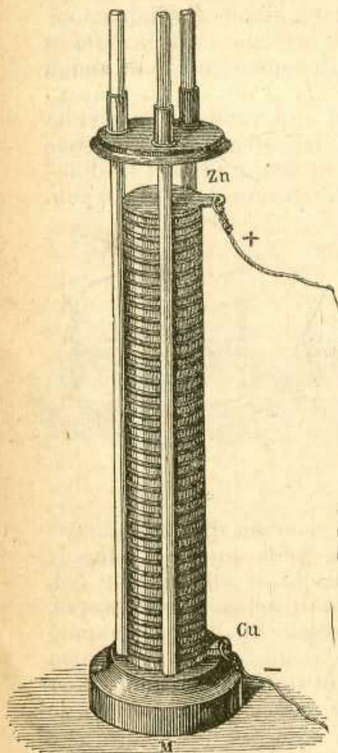


Fig. 388.

ture. La carica e la scarica del condensatore si possono ripetere, nel modo descritto, un numero infinito di volte.

Accostando nell'aria, anche a brevissima distanza, i capi liberi dei reofori di una pila, non viene mai fatto di vedere la scintilla, a meno che non si tratti di una pila di qualche migliaio di coppie; se però i detti capi si portano a contatto, cioè si *chiude il circuito*, si ha un abbondante flusso di elettricità, una *corrente elettrica:* l'equilibrio infatti allora non è più possibile, perchè il conduttore, invece di reagire come il dielettrico allo spostamento di elettricità, cede continuamente (§ 326); cosicchè in ogni sezione del circuito si produce uno spostamento continuo, cioè una corrente; e trascorso appena un periodo iniziale minimo, si stabilisce uno stato di regime pèrmanente, nel quale i valori dello spostamento e delle differenze di potenziale restano costanti. Se la corrente non varia, l'intensità i è data dalla formola:

$$i = \frac{q}{t},$$

dove q è la quantità di elettricità che passa in t secondi per una sezione qualunque del circuito. Supponendo che l'elettrizzazione positiva corrisponda a un eccesso di elettricità, s'imagina che la corrente percorra il conduttore interpolare dal polo positivo al polo negativo; nell'interno della pila poi il circuito si compie andando da quello negativo a quello positivo. Questa, a vero dire, non è che una convenzione, la quale però è generalmente adottata. Identica, per le sue proprietà, è la corrente elettrica che si otterrebbe congiungendo con un filo metallico il conduttore di una macchina elettrica con i cuscinetti, o, in generale, i due poli

di una macchina elettrostatica. Nei due casi però le condizioni fisiche sono molto diverse, a cagione massimamente della resistenza che la corrente incontra: nella pila si ha relativamente una piccola differenza di potenziale, ma nella corrente è impegnata una grande quantità di elettricità; nella macchina elettrica accade il contrario. La corrente fornita dalla pila può rassomigliarsi alla corrente maestosa di un fiume che non presenta grandi dislivelli; la corrente di una macchina elettrica potrebbe paragonarsi invece a quella di un liquido costretto a scorrere a stento entro un canale sottile, sotto una forte pressione. E un'altra notevole differenza fra i due apparecchi sta in ciò: che nella macchina elettrica l'energia necessaria per la corrente elettrica è estrinseca, è fornita cioè dal motore esterno che fa girare il disco di vetro; nella pila invece risiede nell'apparecchio stesso, ed è dovuta alle azioni chimiche che vi si compiono.

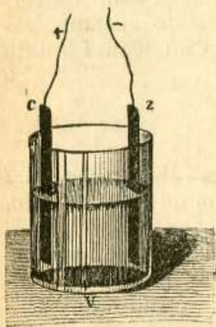


Fig. 389.

341. **Sede della forza elettromotrice. Teoria del contatto e teoria chimica della pila.** — Stacchiamo ora dalla corona un *elemento*, rappresentato dalla fig. 389; la lastrina di rame vi è segnata *C*, la lastrina di zinco *Z*, ad esse sono saldati due reofori di rame la cui differenza di potenziale misura la forza elettromotrice dell'elemento. Secondo le idee del Volta, la forza elettromotrice risiede principalmente nel contatto del reoforo di rame collo zinco, ossia nel punto *Z*; quello si elettrizza negativamente, questo

positivamente; il liquido poi eguaglia il potenziale dello zinco e della lastra di rame *C*, che così risulta positiva. Se si chiude il circuito, stando alla convenzione detta sopra, la corrente circolerà nel reoforo andando dal polo positivo (rame) a quello negativo (zinco), e nell'interno della coppia invece dallo zinco al rame.

Quando la corrente circola, lo zinco rapidamente si trasforma in solfato di zinco, posto che l'acqua contenga acido solforico; l'idrogeno intanto si svolge non già a contatto dello zinco, ma a contatto del rame. Fu in seguito alla osservazione di tali azioni chimiche, che il Fabroni ed altri s'indussero, sino dal principio, a negare la forza elettromotrice nel contatto dei metalli: opinarono essi invece che la vera sede della *forza elettromotrice* risiede nel contatto dei metalli col liquido; che i fenomeni elettrici sono una conseguenza dei fenomeni chimici; che la forza elettromotrice è tanto maggiore quanto più energiche sono le dette azioni, l'acido elettrizzandosi positivamente ed i corpi attaccati negativamente; che la differenza di potenziale sui reofori dipende dalla differenza delle forze elettromotrici dovute alla diversa azione dell'acido sul rame e sullo zinco.

Questa *teoria chimica* della pila interpreta bene anch'essa le esperienze fondamentali del Volta. Quando si tiene in mano lo zinco per caricare il piatto collettore dell'elettroscopio (fig. 386), bisogna che le dita sieno madide, affinchè, secondo il Volta, stabiliscano una buona comunicazione con la terra; ma allora l'umidità delle dita agirà chimicamente sullo zinco che si elettrizza negativamente, e da qui la divergenza negativa delle foglie. Nella seconda prova non si ottiene effetto alcuno, perchè il rame non è sensibilmente attaccato dall'umidore delle

mani; la divergenza delle foglie si verifica invece ed è positiva, quando il piatto collettore comunica con il panno o la carta bagnata, perchè l'acqua acidulata si elettrizza allora positivamente per l'azione chimica sullo zinco, e comunica la sua elettricità al piatto dell'elettroscopio.

Vogliamo ora osservare che, anche secondo questa teoria chimica, il senso della corrente è quello stesso che si è innanzi stabilito in base alla teoria del contatto: difatti, stando ad essa, la forza elettromotrice risiede principalmente nel contatto del liquido collo zinco che è il metallo fortemente attaccato dall'acido, e si può fare astrazione dalla debole azione nel contatto del liquido col rame; lo zinco *Z* ed il reoforo di cui è munito diventano negativi, e l'acqua acidulata positiva; la lastrina di rame *C* non fa che raccogliere l'elettricità positiva del liquido, e quindi diventa positiva; la corrente circolerà ancora nel senso detto innanzi.

La decomposizione chimica dei liquidi composti ottenuta da Nicholson, Carlisle, Vassalli ed altri col porre i liquidi stessi a far parte del circuito esterno che congiunge i poli della pila, venne ben presto e mostrare quanto intimo sia il legame esistente fra i due ordini di fenomeni, e a dar forza così alla teoria chimica.

Senza entrare, per ora, in particolari, converrà premettere qualche nozione fondamentale sul fenomeno della decomposizione dell'acqua, e ciò per la maggiore intelligenza di quello che ci resta a dire intorno alla pila. Inseriamo nel circuito esterno dell'acqua leggermente acidulata: il vaso che la contiene è detto *voltametro* (fig. 390); i due fili o laminette per cui la corrente entra ed esce dal liquido sono detti *elettrodi*, e precisamente *anodo* quello congiunto al polo positivo della pila, e *catodo* l'altro

congiunto al polo negativo. Tosto che la corrente passa, si osserva uno svolgimento di gas ai due elettrodi, indizio che l'acqua si decompone; raccogliendo i gas col mezzo di due campanelle, si constata che al catodo si svolge l'idrogeno e all'anodo l'ossigeno.

Come l'acqua, si decompongono al passaggio della corrente, molti altri liquidi composti: la decompo-

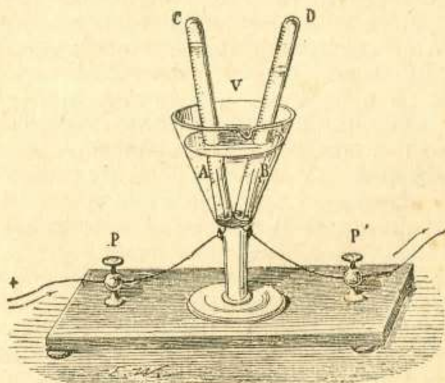


Fig. 390.

sizione così ottenuta è detta *elettrolisi*, e il corpo decomposto è l'*elettrolito;* i prodotti della decomposizione poi sono detti *ioni.* Questi non si svolgono che al contatto dell'anodo e del catodo. Si ammette che gli atomi, allorchè si separano dalle combinazioni chimiche, siano elettrizzati: nel caso dell'acqua, per esempio, l'atomo di ossigeno risulta elettrizzato negativamente, mentre i due atomi di idrogeno hanno una carica positiva eguale in valore assoluto a quella negativa dell'atomo di ossigeno. Per

ispiegare il fenomeno dell'elettrolisi, in accordo con le leggi del Faraday che lo governano, si ammette che ogni molecola d'un elettrolito può scindersi in due ioni, cioè in due atomi o gruppi d'atomi aventi cariche elettriche eguali e di segni contrari. Ed anzi quando un acido o un sale si discioglie nell'acqua, avviene che parte delle sue molecole subisce la dissociazione, cosicchè nel liquido vagano ioni liberi. Nei reciproci incontri può accadere che nuove molecole si scindano in ioni, e che ioni di segno contrario si riuniscano a ricomporre le molecole. A ogni modo le cariche libere positive eguaglieranno, a ogni istante, quelle negative, e la soluzione si manterrà neutra. Ora supponiamo che due elettrodi comunicanti con i poli di una pila siano immersi nella soluzione: i ioni non si moveranno più indifferentemente in tutte le direzioni, ma quelli positivi si dirigeranno prevalentemente verso il catodo, e quelli negativi verso l'anodo. S'intende ora che nell'elettrolisi dell'acqua, i ioni d'idrogeno che portano cariche positive devono dirigersi al catodo, e quelli di ossigeno carichi negativamente all'anodo, come veramente accade.

Ma la corrente, oltre a circolare nel circuito esterno dal polo positivo a quello negativo, circola anche nell'interno della pila da questo a quello, e perciò non soltanto i liquidi composti inseriti nel circuito esterno, ma lo stesso liquido di ciascuna coppia deve subire la medesima decomposizione. Difatti, preparata una coppia con acqua acidulata e le solite laminette di rame e di zinco, supposto quest'ultimo perfettamente puro e amalgamato, non si osserva alcuno svolgimento gassoso finchè il circuito rimane aperto; ma non si tosto, chiudendo il circuito, si stabilisce la corrente, si osserva uno svolgimento di idrogeno sulla laminetta di rame, mentre

lo zinco si trasforma in solfato di zinco. Dunque, mentre il circuito è percorso dalla corrente, l'elettricità è trasportata nel seno del liquido dai ioni; cioè la corrente nel liquido è costituita dal trasporto delle elettricità positiva e negativa effettuato, nei due opposti sensi, dai ioni.

Le leggi del fenomeno sopra ricordate del Faraday dimostrano questo fatto fondamentale, che cioè *l'elettrolisi dello stesso liquido della pila e la produzione di corrente sono due fenomeni inseparabili.* Ora secondochè si attribuirà l'iniziarsi della elettrolisi, o alla affinità chimica diversa fra ciascuno dei due metalli e gli elementi del liquido, oppure alle forze elettriche dovute alla elettrizzazione dei metalli per reciproco contatto, si verrà a formulare o la teoria chimica o la teoria del contatto della pila; nè sarà possibile dimostrare che la prima soltanto è conforme al vero, se non dimostrando direttamente che non esiste produzione di elettricità per semplice contatto fra conduttori eterogenei.

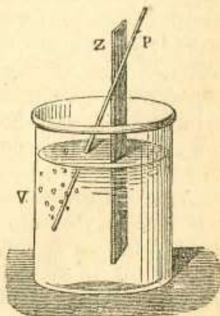


Fig. 391.

Per mostrare che l'azione chimica non si effettua se il circuito è aperto, e invece si manifesta subito al chiudersi del circuito, basterà immergere nell'acqua acidulata una lastrina di zinco amalgamato e una lastrina di platino o di rame: finchè i due metalli sono separati, non si vedrà traccia di idrogeno; ma facendoli toccare esternamente, l'idrogeno comincia subito a svolgersi sul platino (fig. 391). Quando la lastra di zinco è impura e non amal-

gamata, essa reagisce subito con l'acido perchè, non essendo omogenea in tutti i suoi punti, nel contatto di particelle eterogenee prendono origine delle forze elettromotrici che sono la causa dell'azione chimica: il circuito si chiude tra lo zinco, le particelle eterogenee e il liquido, e la corrente circola con lo sviluppo continuo di idrogeno e consumo di zinco.

342. **Polarizzazione della pila.** — La forza elettromotrice di una coppia del Volta, misurata all'elettrometro (in circuito aperto) è poco meno di *1 volta;* ma se si chiude il circuito, la detta forza elettromotrice, e con essa l'intensità della corrente, diminuiscono ben presto, come può constatarsi inserendo un galvanometro sulla via della corrente. Descriveremo in seguito più particolarmente questo prezioso strumento, indispensabile nelle misure elettriche. Per ora ci basti sapere che esso consiste essenzialmente in un ago calamitato girevole in un piano orizzontale intorno a una punta o a un filo che lo regge, in modo da costituire un ago di declinazione (§ 367). Intorno ad esso poi si avvolge in più spire un filò di rame isolato con seta, in modo che le spire siano parallele all'ago quando esso è nella sua naturale posizione di equilibrio. Se s'introduce il galvanometro nel circuito di una corrente, l'ago è deviato; e dalla deviazione che si misura su un cerchio graduato o in altro modo, si può dedurre il senso e il valore della corrente.

La causa di tale indebolimento va ricercata nelle azioni chimiche che avvengono nella pila stessa al passaggio della corrente: l'acido mano a mano si trasforma in solfato di zinco, e viene così a diminuire l'energia chimica disponibile; l'idrogeno seguendo il verso della corrente, va a svolgersi sulla lastra di rame, e la ricopre con un velo che

presenta una forte resistenza al passaggio della corrente. Ma v'ha di più: il rame che assorbe l'idrogeno e se ne ricopre, agisce come un metallo attaccato dall'acido, dà luogo cioè ad una forza elettromotrice contraria a quella della pila; si dice allora che la pila è *polarizzata*, ed il rame così modificato produce una corrente di polarizzazione di senso contrario alla corrente principale.

Per provare questo fatto, stacchiamo i due capi del filo del galvanometro dai poli della coppia suddetta, e uniamoli a due lastrine di rame ben terse, o meglio a due lastrine di platino previamente arroventate. Immergendo tali lamine in una tazza contenente acqua acidulata, non si ha, com'è naturale, corrente alcuna. Sostituiamo ora una lastrina di platino con un'altra di zinco: avremo formato così una coppia voltaica, e tosto l'ago del galvanometro devia; ma se si lascia chiuso il circuito per un certo tempo, la deviazione andrà diminuendo come prima. Sostituendo allora alla laminetta di zinco quella di platino che si era tolta, si constaterà questa volta una deviazione contraria a quella che si aveva con lo zinco.

La prima causa d'indebolimento della corrente si evita rinnovando il liquido, se la pila deve agire molto tempo; più gravi sono la seconda e la terza, e per eliminarle bisogna impedire all'idrogeno di arrivare sul metallo meno attaccabile.

A tal fine furono ideate *le pile a due liquidi*, nelle quali un liquido attacca un metallo, ed un altro liquido *depolarizzante* è destinato a fissare l'idrogeno che nasce dall'azione chimica. Il metallo attaccato per lo più è lo zinco; esso è l'elettrodo negativo, e viene di solito amalgamato per rendere omogenea la superficie, ed impedire così l'azione chimica a circuito aperto.

Ora, come è noto, ogni combinazione chimica svolge calore, si ha cioè una trasformazione di energia potenziale atomica in energia termica, mentre nella decomposizione si ha una trasformazione inversa. Dunque è necessario che il calore che si svolge nella formazione del solfato di zinco, superi quello che vien assorbito, diventando energia potenziale, nella scomposizione del depolarizzante; difatti la corrente elettrica generata dalla pila non solo può produrre l'elettrolisi di un altro liquido contenuto nel circuito, ma svolge anche, come vedremo, calore nel circuito stesso.

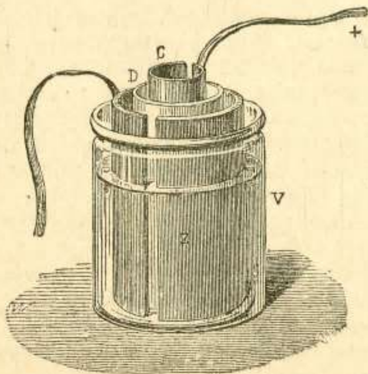


Fig. 392.

343. **Elementi Daniell e Bunsen.** — Nelle coppie Daniell e Bunsen, lo zinco amalgamato, foggiato per lo più a cilindro, pesca in una soluzione di acido solforico nell'acqua. Nella prima (fig. 392) lo zinco abbraccia un vaso poroso pieno di una soluzione satura di solfato di rame, in cui è immerso un

pezzo di rame. Al rame ed allo zinco sono saldati due fili di rame che costituiscono i reofori della pila: il primo è positivo, il secondo negativo. L'idrogeno che si produce quando passa la corrente, si dirige nel verso di questa, e riduce il solfato di rame; questo metallo poi si deposita sulla lastra di rame, che così si ingrossa e non si polarizza. La sua forza elettromotrice è circa di 1,08 *volta*.



Fig. 393.

Nella coppia Bunsen (fig. 393) al solfato di rame si sostituisce nel vaso poroso l'acido nitrico, ed al rame un prisma di carbone da storta. L'acido nitrico viene ridotto dall'idrogeno in anidride nitrosa-nitrica che forma dei vapori rossastri dannosi alla respirazione, e in acqua; bisogna perciò tenere la pila all'aperto o in locale adatto.

Il reoforo unito al carbone è il positivo, e quello unito allo zinco il negativo.

La forza elettromotrice di questa coppia è circa di 1,95 *volta*.

344. **Elemento Leclanché.** — Nella coppia Léclanché, invece dell'acqua acidulata, vi è una soluzione di cloruro ammonico nella quale pesca un bastone di zinco amalgamato; e un prisma di carbone nel vaso poroso è circondato da una mescolanza di coke e di biossido di manganese, che è il corpo depolarizzatore (figura 394). È una pila molto usata, specialmente per tutte quelle applicazioni in cui il circuito deve rimanere interrotto a lunghi intervalli, come succede nei campanelli elettrici.

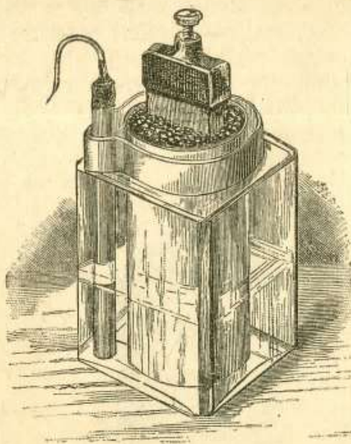


Fig. 394.

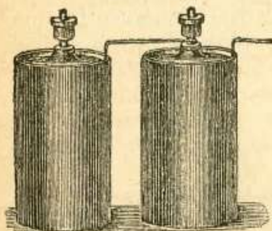


Fig. 395.

La sua forza elettromotrice è di 1,48 *volta.* Sostituendo al liquido segatura di legno inzuppata con la stessa soluzione, e chiudendo l'apertura con un tappo, si ha la pila Leclanché *a secco*, che può riuscir comoda in molti casi (fig. 395).

345. **Elemento Grenet.** — Questa coppia fu ideata dal Poggendorff, ma porta il nome di Grenet che le diede una disposizione assai conveniente per la pratica: essa consta di una boccia di vetro della forma indicata dalla fig. 396, contenente un liquido composto con 100 parti di acqua, 22 di acido solforico e 17 di bicromato potassico, secondo le proporzioni indicate dal Poggendorff. Nel liquido s'immergono due pezzi paralleli di carbone compatto di storta saldati ad un anello metallico portato dal coperchio di ebanite, sul quale è fisso il corrispondente serrafilo. Fra i detti carboni, e isolata da essi, s'insinua una lastra di zinco amalgamato, che si spinge in giù a pescare nel liquido soltanto quando si vuole che la pila funzioni; il serrafilo che le è unito è il polo negativo, e l'altro unito ai carboni è quello positivo. In questo elemento il bicromato potassico, ossidante energico, fissa l'idrogeno che si svolge per la solita reazione dello zinco con l'acido.



Fig. 396.

L'elemento Grenet è comodissimo, non dà esalazioni ed ha una rilevante forza elettromotrice, eguale

a 1,96 *volta*; ma non bisogna tenere a lungo chiuso il circuito.

346. **Elemento Latimer Clark.** — Fra le citate coppie a due liquidi, la Daniell è quella che più di tutte le altre rimane costante a circuito chiuso.

La Bunsen è meno costante, perchè l'acido nitrico viene presto ridotto; nella Leclanché la depolarizzazione si compie prontamente quando si apre il circuito.

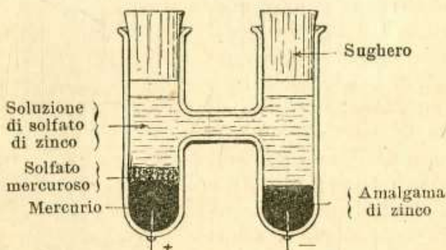


Fig. 397.

La coppia Latimer Clark che ora vogliamo descrivere, non si usa per fornire correnti, ma soltanto come *campione di forza elettromotrice* nelle misure elettrometriche: pare difatti che a circuito aperto la sua forza elettromotrice resti costante, ma ciò a condizione che la temperatura non vari.

Questo elemento si forma ordinariamente con due provette comunicanti fra loro (fig. 397) che contengono l'una mercurio puro ricoperto da solfato mercuroso, l'altra un'amalgama di zinco puro; ed entrambe, sopra le sostanze indicate, una soluzione

di solfato di zinco. Le provette sono chiuse ermeticamente, e ciascun fondo è attraversato da un filo di platino che serve da elettrodo. La sua forza elettromotrice è di 1,434 *volta* a 15°, e diminuisce di 0,001 *volta* per ogni grado di temperatura sopra a 15°.

347. **Misura della forza elettromotrice di una pila con l'elettrometro.** — Prima di andare innanzi, è bene ricordare che l'unità adottata per la misura dei potenziali e delle forze elettromotrici è il *volta.*

In seguito ne daremo la definizione precisa come fu stabilita dai Congressi internazionali degli Elettricisti; per ora ricordiamo che la differenza di potenziale ai due poli di un elemento Latimer Clark, che ne misura la forza elettromotrice, alla temperatura di 15° C. è di 1,434 *volta*, come si è detto qui sopra; e che si richiede una differenza di potenziale di 4800 *volta* circa, affinchè la scintilla scocchi nell'aria, alla pressione ordinaria, fra due palline del diametro di 2 cm. alla distanza di 1 mm.

Se si fa comunicare l'ago dell'elettrometro a quadranti con un polo di una pila a corona di tazze di Volta formata da un centinaio di elementi, di cui l'altro polo comunica con la terra, l'ago, non essendovi corrente, rimane ad un potenziale costante.

Leggendo ora la deviazione quando le due paia di quadranti comunicano separatamente prima coi due poli della coppia che si vuol misurare, poi con i poli dell'elemento Latimer Clark, il rapporto delle due letture sarà pure quello delle forze elettromotrici.

Con un metodo analogo a questo furono determinate, per ciascun elemento descritto, le forze

elettromotrici medie che abbiam dette, e che riassumiamo nel seguente quadro:

Elemento	Volta	0,85
»	Leclanché	1,48
»	Daniell (solfato di zinco e solfato di rame) . . .	0,96
»	Daniell (acqua acidulata a $\frac{1}{10}$)	1,08
»	Bunsen	1,96
»	Grenet	1,96
»	Latimer Clark	1,434

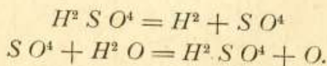
Prima di vedere in qual modo la corrente elettrica dipenda dalla forza elettromotrice della pila e dai corpi che costituiscono il circuito, sarà bene che completiamo le nostre cognizioni intorno ai fenomeni elettrolitici.

348. **Elettrolisi; azioni secondarie.** — Si è visto al § 342 in che consiste il fenomeno dell'elettrolisi; volendo entrare in maggiori particolari, diremo che un elettrolito qualunque si scinde sempre, come l'acqua, nei suoi elementi: l'idrogeno e i metalli si portano al catodo, e il resto della molecola all'anodo. Così, per es., quando si elettrolizza l'acido cloridrico in soluzione fortemente concentrata, l'idrogeno si svolge al catodo e il cloro all'anodo; se l'elettrolito è il cloruro di sodio $Na\,Cl$, il sodio Na si porta al catodo, e il cloro Cl all'anodo. Lo stesso avviene dei solfuri, bromuri, joduri, ecc.: il metallo si porta al catodo ed i metalloidi all'anodo. Quando poi si elettrolizza un composto ternario, per es. il solfato di rame, il rame si trasporta al catodo ricoprendolo d'uno strato rosso, mentre il gruppo acido $S\,O^4$ che gli era unito apparisce all'anodo. Le basi, come per esempio l'idrato potassico $K\,O\,H$, danno co-

stantemente gli anioni di ossidrili OH che sono monovalenti, ed i cationi metallici con le cariche delle loro rispettive valenze

L'acqua ha fornito il primo esempio di decomposizione dovuta alla corrente elettrica; dobbiamo però aggiungere al riguardo che, mentre in passato alcuni pensavano che l'aggiunta dell'acido solforico servisse soltanto a rendere più conduttivo l'elettrolito, oggi si ritiene invece generalmente, con maggior ragione, che il vero elettrolito è l'acido solforico diluito.

Secondo questo modo di vedere, per ogni molecola di acido solforico decomposta, compare al catodo una molecola H^2 d'idrogeno, e all'anodo si porta il gruppo SO^4; questo reagendo poi con l'acqua, ricostituisce la molecola di acido solforico e lascia in libertà un atomo d'ossigeno:

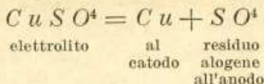


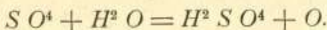
$$H^2 S O^4 = H^2 + S O^4$$
$$S O^4 + H^2 O = H^2 S O^4 + O.$$

Come si vede, il risultato ultimo è che l'acqua viene decomposta con la spesa di una certa energia elettrica, e come corrispettivo si ha una certa energia potenziale atomica disponibile, equivalente al calore che si svolgerebbe ricombinando l'ossigeno e l'idrogeno separati.

Come in questo caso dell'acqua, accade spesso che gli atomi o gruppi di atomi che restano liberi agli elettrodi reagiscano o con questi o con il liquido. Così, per es., se l'elettrolito è il cloruro di sodio, il sodio reagisce con l'acqua al catodo formando idrato sodico $Na\,OH$; elettrolizzando il solfato di rame, il gruppo SO^4 bivalente che si libera all'anodo, reagisce con l'acqua per formare acido solforico che resta in libertà presso l'anodo, e si svolge ossigeno.

Ecco lo schema di decomposizione del solfato di rame:





I ioni dunque reagendo o col solvente, o con l'elettrolito ancora indecomposto, o con gli elettrodi medesimi, danno origine ad *azioni secondarie* che complicano il fenomeno: ne sono esempi quelli che abbiamo ora detto. Nel caso del solfato di rame, se si prende come elettrodo positivo una lamina di rame invece di una di platino, non si svolge già dell'ossigeno, ma il residuo alogene SO^4 si combina col rame per formare ancora del solfato di rame in quantità esattamente uguale a quella che si decompone nel medesimo tempo. In tal modo la soluzione conserva la stessa densità, poichè ad ogni istante l'elettrodo positivo diminuisce di peso tanto di quanto aumenta l'elettrodo negativo; tutto si riduce cioè a un trasporto di rame dall'anodo al catodo.

La stessa cosa accadrebbe nell'elettrolisi del nitrato d'argento con elettrodi d'argento, ecc.

Con elettrodi di platino e con un sale alcalino, come per es. il solfato di potassio K^2SO^4, la decomposizione accade come per il solfato di rame, ma il potassio messo in libertà al catodo reagisce coll'acqua formando il corrispondente idrato e svolgendo idrogeno. D'altra parte il gruppo SO^4 sviluppa ossigeno e forma acido solforico intorno all'anodo. Si mette la cosa in evidenza con un tubo ad U (fig. 398) che si riempie di una soluzione di solfato di potassio colorata con siroppo di viole, e

nella quale si immergono come elettrodi due laminette di platino: un po' di sabbia messa nel fondo impedisce che i liquidi dei due rami si mescolino. Nel ramo *A* nel quale entra la corrente, la tintura si arrossa e si svolge ossigeno; nel ramo *B* dal quale esce, si svolge idrogeno e la tintura si fa verde.

Si riesce anche molto bene a veder la cosa, adoperando una soluzione di solfato di sodio con tintura di tornasole resa neutra con l'aggiunta di poche goccie di un acido debole, quello acetico per esempio: allora la soluzione presenta un color violetto. Sottoponendola alla elettrolisi, essa si arrossa subito nel ramo nel quale si forma acido solforico, e acquista il primitivo colore di un bel bleu nel ramo ove si forma l'idrato potassico.

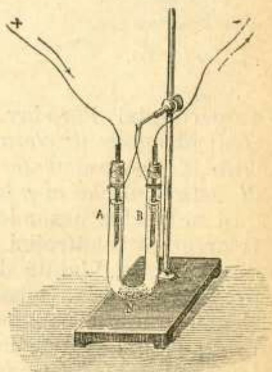


Fig. 398.

Ed anche in molti altri casi le reazioni secondarie alterano e trasformano i prodotti diretti dell'elettrolisi. Per tale ragione, la deposizione de' metalli al catodo si potrà avere soltanto quando essi non reagiscono, nè con l'acqua della soluzione salina, ne' con l'elettrodo. Tuttavia se il sale è in soluzione assai concentrata e l'elettrodo negativo è il mercurio, si possono ottenere le amalgame dei metalli alcalini, i quali furono scoperti dal Davy appunto con questo metodo. Un pezzo di potassa umida è posto sopra una lamina di platino che si congiunge

al polo positivo di una pila: nella potassa si pratica una cavità che si riempie di mercurio, il quale si fa comunicare col polo negativo (fig. 399). Facendo passare una corrente intensa, si svolge sul platino l'ossigeno, e il mercurio si rigonfia e diventa spesso per la sua unione col potassio. Si può in seguito isolare quest'ultimo, facendo vaporizzare il mercurio in un gas inerte. La stessa cosa succede con la soda.

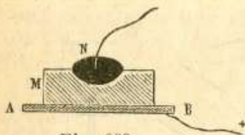


Fig. 399.

349. **Prima legge dell'elettrolisi; il coulomb, l'ampère.** — Le leggi relative all'elettrolisi furono scoperte dal Faraday. La prima può enunciarsi così: *la massa di elettrolito decomposta dalla corrente, è rigorosamente proporzionale alla quantità di elettricità che vi passa.*

Si vede che, basandosi su questa legge, si può ricorrere all'elettrolisi per misurare delle quantità di elettricità. L'unità di elettricità adottata dal Congresso degli Elettricisti a Parigi nel 1881 e dalla Conferenza internazionale del 1884 fu detta *coulomb*, in onore del grande fisico Coulomb; venne poi determinato che un *coulomb* passando nel voltametro ad acqua svolge $0^{gr},00001046$ di idrogeno: questo numero è detto *equivalente elettrochimico* dell'idrogeno.

Cosicchè dalla quantità di idrogeno ottenuto, potremo sapere il numero dei *coulomb* passati nel voltametro; perciò l'apparecchio della fig. 390 potrebbe con maggiore proprietà dirsi *coulombometro*, ma si seguita a dargli il nome antico.

Ora l'intensità *i* della corrente dipende evidentemente dalla quantità di elettricità che passa, nella unità di tempo, in una sezione qualunque del cir-

cuito: dicendo q la quantità che passa nel tempo t, e supponendo la intensità costante, si ha:

$$(1) \qquad i = \frac{q}{t}.$$

Da questa relazione si deduce che l'*unità di intensità*, ossia la *corrente uno*, è quella corrente costante che trasporta un coulomb per ogni minuto secondo: essa è detta *ampère* in onore del sommo fisico e matematico Ampère. L'unità elettromagnetica assoluta (CGS) è 10 volte maggiore. In generale, dividendo il numero dei coulomb passati nel voltametro per il tempo corrispondente, si ha l'intensità media espressa in ampère: sarà il valore vero dell'intensità, se la corrente non varia.

Quando per queste determinazioni si usasse il voltametro ad acqua, come finora abbiamo supposto, si andrebbe incontro ad alcuni errori provenienti dal fatto che non tutto l'idrogeno si svolge al catodo, ma una parte vi resta aderente o assorbita, ed un'altra si scioglie nel liquido; accade pure che parte dell'ossigeno è trasformata in ozono, e però occupa un volume minore.

Questi inconvenienti sono eliminati nel *voltametro a nitrato di argento*, che pertanto riesce più esatto. Ora sapendosi che la quantità di argento messa in libertà da 1 coulomb è $0^{gr},001118$ (§ 350), si divide per questo numero la quantità di argento ottenuta dalla scomposizione del nitrato, e si ha il numero dei coulomb passati nel voltametro; e se la corrente è rimasta costante, si ottiene la sua intensità in *ampère* dividendo il numero dei *coulomb* pel tempo espresso in secondi.

Invece di un voltametro a nitrato d'argento, se ne può anche adoperare uno a solfato di rame con elettrodi di rame.

Nelle dette misure bisogna badare che la *densità della corrente,* la quale si ottiene dividendo la sua intensità per la sezione trasversa del conduttore, non sia nè troppo grande nè troppo piccola, perchè in caso diverso il metallo non forma un deposito compatto sul catodo, il che può dar luogo ad errori. La densità della corrente non deve superare $^1/_5$ di ampère per cm^2 sull'anodo, e $^1/_{50}$ di ampère per cm^2 sul catodo.

Il voltametro deve contenere almeno 100 cm^3 di elettrolito.

350. **Seconda legge dell'elettrolisi.** — L'esperienza poi fornisce quest'altra legge, pure assai importante, che è una conseguenza dell'essere costante la carica dei ioni *che hanno la stessa valenza,* ed è parimenti dovuta a Faraday: *le masse dei vari corpi, che si decompongono o si combinano pel passaggio di una stessa quantità di elettricità, sono proporzionali ai loro equivalenti chimici.* Gli *equivalenti chimici* sono i *pesi atomici* divisi per le rispettive *valenze.* Prendendo eguale a 16 il peso atomico dell'ossigeno, quello dell'idrogeno è eguale a 1,01. Allora l'equivalente chimico dell'argento è 107,9 e coincide con il suo peso atomico, essendo l'argento monovalente; l'equivalente chimico del rame è 31,8, ossia la metà del suo peso atomico che è 63,6, se si considerano i composti ramici, nei quali il rame è bivalente. Per chiarire con un esempio questa legge, supponiamo che una medesima corrente attraversi più voltametri disposti in serie, i quali contengano rispettivamente, per esempio, acqua, soluzione di solfato di rame, di solfato di zinco, di nitrato d'argento, ecc.: si troverà che per 1,01 gr. d'idrogeno che si svolge al catodo nel primo, si depositeranno ai relativi catodi: gr. 31,8 di rame nel secondo, 32,7 di zinco

nel terzo, 107,9 d'argento nel quarto, e così via. I numeri

$$1{,}01;\ 31{,}8;\ 32{,}7;\ 107{,}9$$

rappresentauo appunto i relativi equivalenti chimici dell'idrogeno, del rame, dello zinco, dell'argento, ecc., *prendendo eguale a 1,01 il peso atomico dell'idrogeno.*

E notando che la corrente circola anche nell'interno della pila, si intende subito come alla stessa legge debbano parimenti soddisfare le reazioni che si compiono nell'interno di essa. Se difatti si pesano gli zinchi delle singole coppie in principio e in fine dell'esperimento, si trova che la diminuzione di peso è eguale per tutti; ed è commisurata, secondo la legge esposta, al peso dell'idrogeno che si ottiene nel voltametro ad acqua inserito nel circuito esterno; si vede cioè che per 1,01 gr. di idrogeno ottenuto, si sciolgono in ciascuna coppia $32^{gr},7$ di zinco. Per avere quindi la quantità di argento messo in libertà da una delle sue combinazioni pel passaggio di 1 coulomb, ossia di 1 ampère in un secondo, basterà moltiplicare il numero 107,9 per l'equivalente elettrochimico dell'idrogeno: si ottiene così gr. 0,001118 per l'equivalente elettrochimico dell'argento. Allo stesso modo si determina l'equivalente elettrochimico di un altro corpo, quando si conosca il suo equivalente chimico.

351. **Carica trasportata da un equivalente-grammo.** — Deriva dalla seconda legge che deve passare nei vari elettroliti una medesima quantità di elettricità, affinchè si liberi un *eqivalente-gramma* di tutti i ioni indistintamente. Se nello stabilire gli equivalenti chimici, si parte da quello dell'ossigeno = 8, l'equivalente chimico dell'argento risulta eguale a 107,93; e ritenendo l'equivalente elettro-

chimico dell'argento $= 0,001118$, come si detto, si trova che ogni equivalente-gramma porta seco nell'elettrolisi 96538 coulomb.

Nella seguente tavola sono registrati gli equivalenti elettrochimici di alcuni elementi, ossia la massa loro espressa in grammi che si combina o decompone pel passaggio di un coulomb. I numeri dell'ultima colonna sono evidentemente i loro reciproci.

TAVOLA

ELEMENTI		Peso atomico	Valenza	Equivalente chimico	Equivalente elettro-chimico o grammi per coulomb	Coulomb per gramma
Ossigeno		16	2	8	0,000083	12067
Argento		107,93	1	107,93	001118	894,4
Alluminio		27,1	3	9,03	00009354	10691
Ferro nei composti	ferrici .	56	3	18,67	0001934	5171
	ferrosi .	—	2	28	0002900	3448
Idrogeno		1,01	1	1,01	0000104(	95582
Iodio		126,85	1	126,85	001314	761
Mercurio nei comp.	mercurici	200,3	2	100,15	0010375	963,9
	mercurosi	—	1	200,3	002075	481,9
Nichelio.		58,7	2	29,35	000304	3289
Oro		197,2	3	65,74	0,00681	1468
Piombo		206,9	2	103,45	001072	933,1
Potassio.		39,15	1	39,15	0004055	2466
Rame nei composti	ramici .	63,6	2	31,8	0003294	3036
	ramosi .	—	1	63,6	0006588	1518
Sodio		23,05	1	23,05	0002388	4188
Stagno nei composti	stannici.	118,5	4	29,63	0093069	3258
	stannosi	—	2	59,25	0006138	1629
Zinco		65,4	2	32,7	0003387	2952

352. **Galvanoplastica; argentatura, indoratura galvanica.** — Fra le diverse applicazioni della elettrolisi citeremo quelle dirette a ottenere i metalli,

come il rame, l'alluminio, ecc. dalle loro combinazioni con altri corpi (*metallurgia*); la *galvanoplastica,* per mezzo della quale si ricoprono di metalli i modelli di statue, di medaglie, ecc., formati con gesso, con cera. I modelli, resi conduttori alla superficie per mezzo di grafite in polvere finissima, si sospendono con fili di rame in una soluzione concentrata di solfato di rame, nitrato d'argento ecc., e servono da catodi *N*, di fronte a una lastra di rame o di argento *P* che è l'anodo (fig. 400).

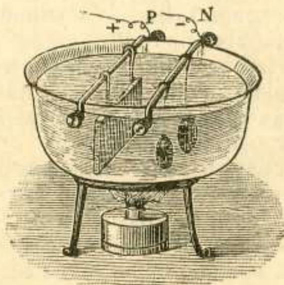


Fig. 400.

A mano a mano che il rame, per esempio, ricopre il catodo, l'anodo per azioni secondarie si scioglie nel bagno, e mantiene concentrata la soluzione; talchè tutto succede come se la corrente trasportasse il rame dall'anodo al catodo.

L'*argentatura,* la *doratura,* la *nichelatura* galvanica, per cui oggetti di rame, di ottone, ecc., vengono ricoperti di argento, oro o nichel, si fondano pure sul medesimo fenomeno. Gli oggetti da ricoprire, dopo essere stati nettati con la massima diligenza, si sospendono in acconcie soluzioni, e ser-

vono da catodi, mentre l'anodo è formato da una lastra del metallo che si vuol deporre. Per l'argentatura si adopera una soluzione di 40 parti di cianuro di potassio e 25 di cianuro di argento per 1000 d'acqua: se si vuole ottenere uno strato di argento compatto al catodo, la corrente non deve essere molto intensa; essa non deve superare *5 milliampère* per ogni centimetro quadrato.

Anche qui l'argento ricopre il catodo, e all'anodo si riforma del sale d'argento, che sciogliendosi mantiene la concentrazione della soluzione.

353. **Pile secondarie.** — Parlando della coppia di Volta, abbiamo detto come la lamina di rame si polarizzi per l'idrogeno che vi si condensa, e come in causa di tale polarizzazione prenda origine una forza elettromotrice di senso contrario, che indebolisce la corrente.

Orbene, anche gli elettrodi di platino di un voltametro ad acqua si polarizzano per causa dell'idrogeno e dell'ossigeno assorbiti e che aderiscono alla loro superficie, di modo che le due lastre di platino si comportano come se fossero due metalli diversi. In grazia di ciò, il voltametro diventa una pila vera e propria, nella quale la forza elettromotrice è dovuta alla polarizzazione degli elettrodi, e rimarrebbe costante se questi si mantenessero saturi. Che il voltametro in cui si è operata la decomposizione dell'acqua si comporti come una pila, è cosa facile a verificarsi; basterà all'uopo togliere il voltametro dal circuito della pila, e chiuderlo sopra sè stesso con un *galvanometro.*

Si potrà così misurare la corrente secondaria dovuta alla forza elettromotrice di polarizzazione, e mantenuta dall'energia chimica dei gas condensati sul platino. La deviazione galvanometrica decresce più o meno lentamente, secondo le condizioni par-

ticolari del circuito; si annullerà quando i gas condensati si saranno ricombinati totalmente, e gli elettrodi saranno depolarizzati.

Su questi fatti si fonda la *pila a gas* di Grove, le cui coppie sono voltametri di forma speciale, dove ciascuna campanella è attraversata in cima da un filo di platino unito ad una lastra pure di platino ricoperta di platino spugnoso, affinchè l'assorbimento de' gas sia maggiore (fig. 401). La lastra immersa nell'ossigeno che funzionava prima da anodo, è il polo positivo della pila secondaria.

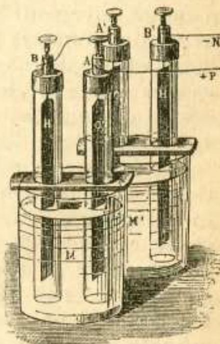


Fig. 401.

La forza elettromotrice di polarizzazione del voltametro ad acqua è 1,48 *volta*: per decomporre dunque l'acqua nel voltametro si richiederà un elettromotore avente una forza elettromotrice superiore a 1,48 *volta*.

354. **Dissociazione elettrolitica.** — Parrebbe quindi che chiudendo il circuito di un solo elemento Daniell con un voltametro ad acqua, la elettrolisi potesse iniziarsi, ma non continuare: difatti i gas separati serviranno in sulle prime a polarizzare gli elettrodi, e non potranno svolgersi; e ciò finchè la forza elettromotrice di polarizzazione contraria a quella della pila non avrà raggiunto un valore eguale a quest'ultima. E poichè la forza elettromotrice d'una Daniell è circa di 1,08 *volta*, quella di polarizzazione non potrà superare questo valore, e resterà al disotto del valor massimo 1,48 *volta*.

Giunte le cose a questo punto, parrebbe che ogni corrente dovesse cessare, essendo la somma algebrica delle forze elettromotrici attive nel circuito eguale a zero; invece l'esperienza prova che la corrente continua a circolare, e però deve con essa necessariamente continuare l'elettrolisi; difatti, per la prima legge, non può passare la benchè minima corrente in un elettrolito senza che avvenga la decomposizione. Si spiega questo fatto, supponendo che i gas abbandonino spontaneamente mano a mano gli elettrodi di platino, e si ricombinino in seno alla massa liquida; in conseguenza, quando la quantità dei gas separati dalla corrente sarà uguale a quella che si ricombina, si stabilirà una specie di equilibrio dinamico, e continuerà la trasmissione elettrolitica della corrente.

Che i gas assorbiti dagli elettrodi finiscano per rendersi di nuovo liberi, è provato dal fatto che in un voltametro abbandonato a sè stesso la forza elettromotrice di polarizzazione va continuamente diminueudo; e questa è pure la ragione che gli accumulatori (§ 356) si scaricano spontaneamente: ma come si può spiegare che la elettrolisi venga operata anche da forze elettromotrici debolissime? Per render conto di questo fatto bisogna supporre che le molecole dei composti elettrolitici, quando si trovano in soluzione, siano in parte dissociate, ossia separate ne' loro ioni costitutivi, formati da atomi o gruppi d'atomi aventi cariche eguali e contrarie, cosicchè in seno al liquido vi siano già dei ioni liberi positivi e negativi. E per mettere d'accordo questa teoria con le leggi dell'elettrolisi del Faraday, bisogna ammettere che tutti i ioni monovalenti hanno, in valore assoluto, cariche eguali; quelli bivalenti una carica doppia. Se si considerano poi gli equivalenti grammi dei singoli ioni, avranno

ciascuno una carica positiva o negativa di 96538 coulomb.

La dissociazione sarà tanto maggiore, quanto più grande sarà il volume concesso alle molecole, ossia quanto più la soluzione sarà diluita; ma in ogni caso la somma algebrica delle cariche elettriche appartenenti ai ioni divenuti liberi deve essere eguale a zero, perchè non si osserva alcuna elettrizzazione per quanto la soluzione sia diluita. Con ciò non s'intende dire che le molecole non dissociate e i ioni liberi sieno sempre gli stessi; accadrà invece continuamente che delle molecole si sfasciano ed altre si ricompongono: avverranno cioè, per così dire, continui connubi e divorzi, nonostante i quali il numero delle molecole dissociate rimane sensibilmente lo stesso.

I ioni si muovono con le loro cariche irregolarmente in tutte le direzioni, finchè nella soluzione non si introducano due elettrodi a potenziale differente; allora, per quanto piccola sia questa differenza di potenziale, i movimenti dei ioni si orientano: quelli positivi si moveranno prevalentemente verso il catodo nel senso della corrente, e quelli negativi andranno invece all'anodo, movendosi in senso contrario; gli uni e gli altri cedono agli elettrodi le loro rispettive cariche e ivi si rendono liberi.

Secondo questa teoria non è dunque la corrente che opera la decomposizione degli elettroliti, giacchè in questi si trovano già dei ioni liberi, tanto più quanto maggiore è il grado di diluizione: anzi, la corrente stessa nel liquido risulta dal movimento dei ioni positivi verso il catodo e dei ioni negativi verso l'anodo, ai quali elettrodi essi trasportano seco loro le proprie cariche.

I liquidi chimicamente puri non sono conduttori, perchè le loro molecole non sono dissociate che

in minima parte; al contrario le soluzioni sono conduttrici, perchè le molecole sono in gran parte dissociate, e la conduttività loro è tanto maggiore, quanto maggiori sono e il numero dei ioni liberi e la loro velocità.

Riassumendo, diremo che il fenomeno dell'elettrolisi è dovuto ai ioni messi in moto dalle forze elettriche provenienti dagli elettrodi. Un elettrolito contiene sempre un certo numero di ioni delle due specie, ed in esso il fenomeno della corrente consiste nel trasporto delle cariche opposte effettuate dai ioni. Questi si considerano dunque come i soli veicoli dell'elettricità: il solvente e le molecole non dissociate non hanno altro effetto che di opporre una certa resistenza al loro moto.

355. **Elettroni.** — A questo punto Helmholtz (anno 1881) fece acutamente osservare, come dalle leggi dell'elettrolisi sorga l'idea che la carica elettrica spettante ad ogni valenza d'un ione sia una quantità fissa avente un'esistenza a parte; e come sia naturale il supporre che le cariche cedute dai ioni conservino persistentemente la loro individualità, e una volta entrate nel circuito conservino la loro separata esistenza, senza fondersi, per così dire, nella massa continua del supposto fluido elettrico in moto. Le cariche elettriche che unite agli atomi formavano i ioni, una volta isolate sono dette *elettroni*, specie di atomi elettrici, e la corrente elettrica entro i metalli sarebbe costituita dal moto degli elettroni stessi.

E siccome diversi fenomeni, i raggi catodici per esempio, provano l'esistenza di elettroni negativi isolati, dotati di grandissima velocità, mentre mancano le analoghe indicazioni in favore degli elettroni positivi, così molti ammettono che solo gli elettroni negativi possono abbandonare i supporti

materiali, ed essere isolati. I fenomeni della corrente elettrica pertanto, ammettendo tale ordine di idee, sarebbero dovuti unicamente al moto degli elettroni negativi: ossia ogni ione negativo che giunge all'anodo diventa un atomo cedendo al metallo i suoi elettroni eccedenti; questi poi col loro moto nel conduttore metallico costituiscono la corrente, che avrebbe così in realtà una direzione opposta a quella che le è stata arbitrariamente assegnata. Gli elettroni poi, arrivando per l'arco metallico al catodo, andranno a congiungersi con i ioni positivi trasformandoli in atomi neutri.

356. **Accumulatori.** — Il voltametro, come si è visto, è un apparecchio capace di ricevere e conservare, a spese di una certa energia elettrica, una equivalente quantità di energia potenziale chimica, e di restituirla poi nuovamente sotto forma di corrente. Dandogli una forma appropriata affinchè l'energia accumulata sia notevole, esso forma la pila del Grove che si è detta; ma ben più importanti sono gli *accumulatori.*

Questi possono considerarsi de' voltametri con elettrodi di piombo, dove, per effetto di una corrente intensa, l'anodo assorbe dell'ossigeno e si soprossida, mentre il catodo assorbe idrogeno e l'ossido vi si riduce a piombo metallico spugnoso. Sebbene a stabilirne i punti fondamentali della teoria abbiano concorso molti fisici, si deve però a G. Planté attribuire il merito di avere inventato accumulatori che possono servire nelle industrie.

L'accumulatore del Planté (an. 1860) consiste semplicemente in due ampie lastre di piombo avvolte l'una accanto all'altra, ed impedite di toccarsi da striscie di guttaperca (fig. 402): il tutto è immerso in una miscela di dieci parti di acqua distillata ed una di acido solforico puro.

Si fanno servire le due lastre da elettrodi, congiungendole ai poli di due o tre coppie Bunsen: se s'interrompe la corrente di carica quando i gas si svolgono liberamente, e si riuniscono con un conduttore le due lastre di piombo, si ha attraverso il circuito una corrente di scarica, la quale restituisce gran parte dell'energia che prima vi si era spesa.

L'esperienza insegnò presto che allo scopo di accumulare una notevole quantità di energia, oc-

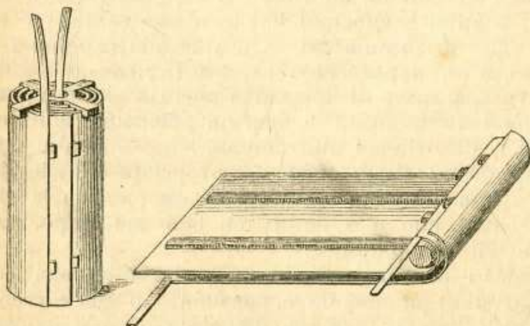


Fig. 402.

corre rendere gli elettrodi porosi, e quindi più permeabili all'azione chimica. Per riuscire in questo intento bisogna ripetutamente caricare e scaricare gli elettrodi, una volta in un senso e la successiva in senso contrario: con ciò la lastra positiva si copre di biossido, mentre il biossido della negativa viene ridotto in piombo metallico di struttura cristallina.

Questo processo è detto *formazione*, e dura parecchio tempo; quando l'accumulatore è *formato*, gli

elettrodi nella carica non si devono più invertire, e l'apparecchio è pronto a ricevere una buona provvista di energia chimica sotto forma di biossido di piombo e ossigeno da una parte, e di piombo spugnoso ed idrogeno dall'altra, separati dall'acido e dal solfato di piombo che si produce.

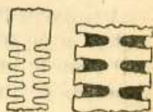


Fig. 403.

Quando poi, terminata la carica, si riuniscono i due elettrodi con un filo, si ha in questo una corrente diretta dalla lastra che ha funzionato da elettrodo positivo (anodo) all'altra (catodo).

Il processo di formazione venne di poi notevolmente abbreviato in grazia a una speciale costruzione delle lastre, originariamente ideata da Faure (anno 1880). Nell'accumulatore del Faure gli elettrodi di piombo sono rivestiti da uno strato di minio, ossido di piombo, tenutovi aderente con un guscio di feltro.

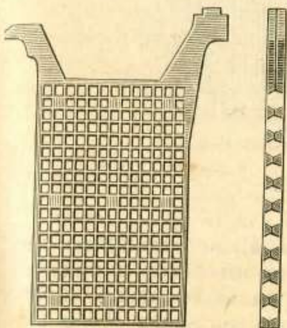


Fig. 404.

Lasciando passare la corrente elettrica, il minio, in un tempo relativamente breve, si soprossida su una delle lastre, e si riduce a piombo finamente poroso sull'altra: l'accumulatore è così presto formato.

Il processo è sostanzialmente rimasto lo stesso anche nei più recenti accumulatori del Tudor e di altri, nei quali le lastre di piombo e di antimonio hanno dei profondi solchi vicini e paralleli (fig. 403), o formano delle vere grate a trafori (fig. 404): i

solchi poi o i fori vengono riempiuti di minio impastato con acqua acidulata, che si comprime bene affinchè non abbia a sgretolarsi e cadere dalla lastra.

Si unisce l'antimonio al piombo, per dare alla lastra una maggiore rigidità e consistenza. Come nell'accumulatore Faure, il minio dell'anodo si sovrossida e quello del catodo vien ridotto.

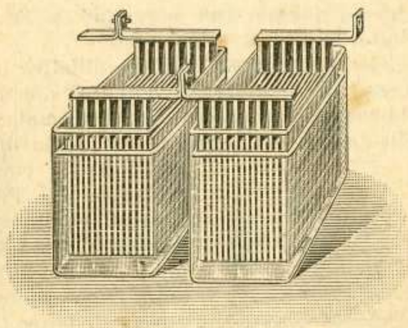


Fig. 405.

La fig. 405 mostra due di tali accumulatori: ciascun elemento è formato da un certo numero di lastre positive e negative; tanto le prime che le seconde sono riunite fra loro, ma senza che le positive possano venire internamente a contatto delle negative: striscie di vetro o di ebanite impediscono i contatti.

Gli accumulatori prestano grandi servigi: intanto vanno sostituendo le pile nei grandi uffici telegrafici; servono alla illuminazione elettrica, ad azionare motori elettrici, ecc.

La corrente adoperata nella carica non deve superare un certo valore che dipende dal tipo dell'accumulatore, dal peso e dalle dimensioni degli elettrodi: se l'intensità è troppo forte, le reazioni chimiche non hanno tempo di compiersi, e i gas si svolgono subito con sciupio di energia.

Si ritiene che la corrente di carica debba avere in media l'intensità di 1-2 *ampère* per dm.[2] di elettrodi, e si sospende quando i gas si svolgono liberamente: allora la forza elettromotrice può arrivare a 2,5 *volta*, ma scende quasi subito a 2 *volta*. Durante la scarica poi discende lentamente sino a 1,8 *volta*: arrivati a questo punto, essa comincia a decrescere rapidamente; allora si sospende la scarica e bisogna ricaricare l'accumulatore, altrimenti la lastra negativa si ricopre di una crosta poco conduttrice di solfato di piombo. Si calcola che la capacità di un mediocre accumulatore è circa di 9 *ampère-ora* per un chilogrammo di elettrodi; ossia che un chilogrammo di elettrodi può restituire nella scarica circa 32.000 *coulomb*. E poichè durante la scarica la forza elettromotrice è in media di 1,9 *volta*, ogni chilogrammo fornirà l'energia utile di circa 17 *watt-ora*, a condizione peraltro che la corrente di scarica non superi 2 *ampère* per chilogrammo.

Il rendimento in quantità di un buon accumulatore, ossia il rapporto fra la quantità di elettricità restituita nella scarica e quella comunicata nella carica, è circa di $\frac{80}{100}$.

357. **Resistenza elettrica; unità di resistenza, l'ohm.** — Abbiamo veduto che per la circolazione continua dell'elettricità, è necessaria che una serie non interrotta di conduttori riunisca i due poli dell'elettromotore aventi una differenza di potenziale elettrico, differenza che *a circuito aperto* mi-

sura la forza elettromotrice dell'elettromotore medesimo.

La corrente poi soddisfa alla legge di continuità, vale a dire che qualunque sia la sezione del circuito *semplice* che si considera, vi passa in un dato tempo la stessa quantità di elettricità. L'esperienza conferma direttamente questa legge, perchè intercalando nel circuito qua e là dei voltametri a nitrato di argento o ad acqua, in tutti essa scompone la medesima quantità di elettrolito: ne deduciamo che, volendo misurare l'intensità della corrente in un *circuito semplice*, non abbiamo punto a preoccuparci di scegliere per la misura questo o quell'altro punto; dappertutto la corrente ha la stessa intensità, e il lavoro che da essa si può raccogliere è il medesimo dovunque.

Teniamo presente che l'intensità dipende dalla quantità di elettricità che nell'unità di tempo passa per una sezione qualunque del circuito (§ 349), e che la sua misura si può comodamente fare con un voltametro, o col galvanometro, ritenendola proporzionale alla deviazione dell'ago se questa è piccola.

Ora la quantità di elettricità che la pila può mettere in movimento in un secondo, vale a dire l'intensità della corrente, dipende, oltre che dalla forza elettromotrice, anche dalle condizioni del circuito; possiamo difatti verificare che uno stesso elettromotore fornisce correnti d'intensità diversa, a seconda dei vari conduttori che ne chiudono il circuito.

Tutti i corpi, anche gli ottimi conduttori come l'argento e il rame, offrono una certa resistenza al passaggio della corrente; tale resistenza dipende dalla natura del conduttore, aumenta proporzionalmente alla sua lunghezza, e diminuisce propor-

zionalmente alla sua sezione. Si ha cioè, indicando con k la resistenza di un filo di 1 m. di lunghezza e di 1 mm.² di sezione, che la resistenza r di un filo lungo l metri e della sezione di s mm.², è data da:

$$r = k \frac{l}{s}. \tag{1}$$

Intenderemo subito quanto sia diversa l'attitudine dei vari corpi a condurre la corrente, se considereremo quello che avviene nei cavi sottomarini: la corrente percorre nel conduttore metallico parecchie migliaia di chilometri, anzichè attraversare pochi millimetri di guttaperca che la separano dall'acqua. I metalli sono i migliori conduttori dell'elettricità come del calore, ma non conducono tutti in egual grado: l'argento è dotato della maggiore conduttività, il mercurio della minore; il rame conduce un po' meno dell'argento, ma assai meglio del ferro, ecc., ecc. Per tutti i metalli poi, la resistenza aumenta col crescere della temperatura.

Anche i liquidi della pila offrono una resistenza al passaggio della corrente, e di gran lunga maggiore de' metalli; si può adottare la (1), ritenendo che l sia la distanza fra gli elettrodi, e s la sezione al passaggio della corrente.

L'unità di resistenza è l'*ohm legale* [1], che è la resistenza offerta alla corrente da un cannello di mercurio della sezione di 1 mm.² e della lunghezza di 106 cm., alla temperatura di 0°. L'*ohm internazionale* è poco diverso: esso equivale alla resistenza opposta al passaggio della corrente da un cannello di mercurio a 0°, della sezione di 1 mm.² e della lunghezza di cm. 106,3.

---

[1] Dal nome di Ohm, grande fisico tedesco.

La tabella seguente contiene la resistenza k, in ohm internazionali, offerta al passaggio della corrente da alcuni corpi d'uso più frequente, con le variazioni dovute alla temperatura; i numeri però variano col grado di purezza de' metalli.

METALLI A 0° C. PURI E RICOTTI	Resistenza in ohm internaz. di 1 m. di filo avente 1 mm.² di sezione	Coefficiente di temperatura α
Mercurio	0,94073	0,00389
Argento	0,01468	400
Rame	0,01598	388
» elettrolitico	0,01561	428
Oro	0,02197	377
Alluminio	0,02665	435
Zinco	0,05751	406
Ferro	0,09065	625
Platino	0,10917	367
Nichelio	0,12323	622
Stagno	0,13048	440
Piombo	0,20382	411
Antimonio		389
Bismuto		354
Leghe		
Bronzo fosforoso	0,01600	394
Argentone	0,30000	036
Platino e Argento 1 a 2	0,31582	024
Manganina	0,46700	002
Rame e manganese	1,00600	004
Costantano	0,50000	— 0,00003
Ottone	0,08000	
Carbone di storta		— 0,005

Il filo telegrafico è di ferro zincato: quello dei *circuiti diretti* italiani ha il diametro di 5 mm. in media, e presenta una resistenza di circa 7 *ohm* al chilometro; il filo dei *circuiti omnibus* è di 3 mm., con una resistenza di 17 *ohm* per chilometro. Il filo telegrafico francese è del diametro di 4 mm., e presenta la resistenza di circa 10 *ohm* per chilometro.

358. **Cassette di resistenza, reostati.** — Per le misure elettriche è necessario poter disporre di serie di resistenze, i cui valori crescano in modo regolare. I fili delle dimensioni necessarie, coperti di seta o altrimenti isolati, vengono piegati in doppio e avvolti in eliche cilindriche (figura 406) coi capi saldati a due grossi pezzi d'ottone *A*, *B* che non si toccano, ma presentano un intervallo che può essere chiuso per mezzo di una spina; basta togliere questa spina per introdurre la corrispondente resistenza nel circuito. Di simili *rocchetti di resistenza* se ne racchiudono parecchi in una cassetta (fig. 407), saldandone i termini ai rispettivi pezzi prismatici di ottone fissati sopra un piano di eba-

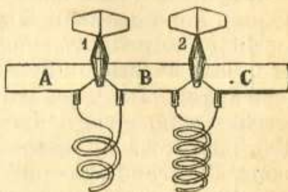


Fig. 406.

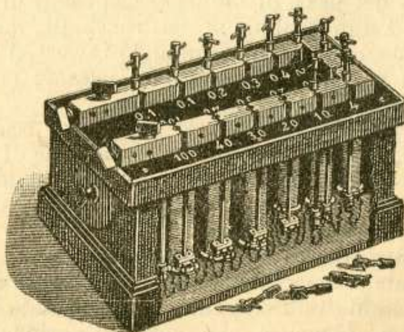


Fig. 407.

nite che forma il coperchio della cassetta; quelli all'estremità sono muniti di serrafili. Tra un pezzo e l'altro, in appositi vani troncoconici, si conficcano delle spinette di ottone con impugnatura coibente, le quali sono destinate a porre in corto circuito il rocchetto sottostante finchè occupano il rispettivo foro, e ad inserirlo invece nel circuito tosto che s'estraggono. Di fianco poi a ciascun pezzo, sul coperchio, sono incisi i numeri che indicano le resistenze dei rocchetti sottoposti; d'ordinario esse crescono di grandezza coll'ordine progressivo: 1, 2, 2, 5; 10, 20, 20, 50; 100, 200, 200, 500, ecc., ordine che permette di comporre una resistenza espressa da qualunque numero intero compreso fra l'unità e il doppio del rocchetto più resistente.

Supponiamo tutte le spinette poste nei loro fori e stretti i reofori nei serrafili estremi: essendo la resistenza dei pezzi di ottone trascurabile di fronte a quella di uno qualunque dei rocchetti, questi si trovano fuori del circuito; quando invece si levano una o più spine, la corrente deve passare pei rocchetti corrispondenti.

Se le correnti sono forti, si usano, per regolarne l'intensità, reostati costruiti con una serie di eliche metalliche (argentana) fatte di grossi fili, le quali agevolmente possono essere introdotte od escluse dal circuito, sia col mezzo suddetto delle spine, sia con altri artifizi facili a imaginare.

Le resistenze regolabili sono spesso usate a mantenere costante una corrente, compensando i cambiamenti di resistenza che possono verificarsi nel circuito; onde il nome loro di *reostati.*

359. **Legge d'Ohm.** – Quando il circuito d'una pila è aperto, il potenziale ha un valore costante su ciascuno dei due reofori: è positivo nei punti del reoforo unito al polo positivo, negativo nei punti

dell'altro, e la differenza dei due potenziali misura la forza elettromotrice della pila. Ma quando il circuito si chiude e la corrente si stabilisce, il potenziale varia da un punto all'altro del reoforo, andando sempre diminuendo dal polo positivo a quello negativo.

Ohm stabilì, per il primo, una legge di importanza fondamentale, la quale assegna in che modo varia il potenziale lungo il circuito: se indichiamo con Δ la differenza di potenziale di due punti del circuito fra i quali non sia attiva alcuna forza elettromotrice, con i l'intensità della corrente, e con r la resistenza compresa fra i detti punti, si ha, essendo c una costante:

$$\Delta = c \, . \, i r ;$$

vale a dire, per una data intensità, il potenziale varia proporzionalmente alla resistenza, e per una data resistenza esso è proporzionale all'intensità. Se si adottano le unità del sistema dell'Elettrotecnica, ossia se il potenziale si misura in *volta*, la corrente in *ampère*, la resistenza in *ohm*, la costante c è uguale all'unità; e la formola diventa più semplicemente:

$$\Delta = i r. \tag{1}$$

Si vede che un conduttore presenta la resistenza di 1 *ohm* se, mantenendo la differenza di potenziale di 1 *volta* alle sue estremità, vi si stabilisce la corrente di 1 *ampère*.

Se il conduttore è omogeneo e di costante sezione trasversale, il potenziale varia lungo esso uniformemente; e se si imagina di elevare su ogni punto del conduttore, supposto rettilineo, una normale di lunghezza proporzionale al valore del po-

tenziale in quel punto, le estremità di tutte codeste normali sono su una linea retta.

Applicando poi la legge di Ohm non più a un tratto del conduttore, ma all'intero circuito, si trova che l'intensità della corrente è uguale alla forza elettromotrice E della pila divisa per la resistenza R dell'intero circuito. Ossia, adottando per la intensità, la forza elettromotrice e la resistenza, le unità pratiche suddette, si ha:

$$i = \frac{E}{R}. \tag{2}$$

Nelle applicazioni si usano strumenti, detti *amperometri,* che danno direttamente la misura di una corrente in *ampère*, inserendoli nel circuito; ve ne sono poi anche altri detti *voltometri* che, messi in derivazione, servono a misurare, come gli elettrometri, la differenza di potenziale di due punti qualunque del circuito. La resistenza può essere dedotta dalle due misure suddette; ovvero può essere calcolata conoscendo la resistenza di un filo della stessa natura, avente un metro di lunghezza e la sezione di 1 mm.², come indica la (1) del paragrafo precedente.

360. **Diversa distribuzione degli elementi di una pila.** — Noi abbiamo sin qui supposto il circuito semplice, ma la legge di Ohm serve a trovare l'intensità della corrente anche quando il circuito si divide in più rami derivati. Di questo problema ci occuperemo in seguito; ora vediamo quale disposizione convenga meglio dare ai vari elementi costituenti una pila. Avendosi un certo numero n di coppie identiche, ciascuna di forza elettromotrice ε e di resistenza interna ρ, possiamo aggrupparle in più modi per formare una pila; e si presenta naturale il problema di cercare la di-

sposizione più vantaggiosa in ciascun caso. Sia r la resistenza del filo interpolare: se si uniscono gli *n elementi in serie* uno dopo l'altro, come nella fig. 408, le loro forze elettromotrici e le resistenze interne si sommano; talchè l'intensità della corrente I sarà data dalla relazione:

$$I = \frac{n\varepsilon}{n\rho + r} = \frac{\varepsilon}{\rho + \frac{r}{n}}.$$

Consideriamo due casi: quello nel quale la resistenza interpolare r è molto grande e la resistenza delle singole coppie invece è molto piccola; e l'altro

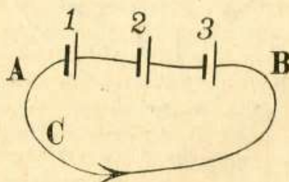


Fig. 408.

caso nel quale, al contrario, la resistenza interpolare è trascurabile rispetto a quella delle coppie. Nella prima ipotesi la formula si riduce sensibilmente a:

$$I = \frac{n\varepsilon}{r},$$

e si vede che l'intensità cresce proporzionatamente al numero delle coppie. Nella seconda ipotesi si ha invece:

$$I = \frac{n\varepsilon}{n\rho} = \frac{\varepsilon}{\rho};$$

non si guadagna dunque niente ad aumentare il numero delle coppie, l'intensità essendo sensibilmente la stessa che con una sola coppia.

Riuniamo ora gli n *elementi in superficie*, ossia riuniamo i loro poli positivi in un sol punto A, e così i poli negativi nel punto B; poi congiungiamo A e B con il reoforo di resistenza r (fig. 409). Si

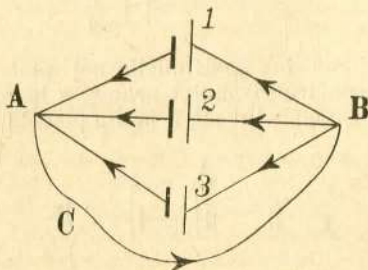


Fig. 409.

ha allora $E = \varepsilon$, e la resistenza interna uguale a $\frac{\rho}{n}$, dappoichè non si ha in realtà che una coppia sola di superficie n volte maggiore, e per conseguenza di resistenza n volte più piccola. Dicendo I_1 l'intensità della corrente in questo caso, si ha:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{\frac{\rho}{n} + r} = \frac{n\varepsilon}{\rho + nr}.$$

Se r è molto grande rispetto a ρ, la formula si riduce a $I_1 = \frac{\varepsilon}{r}$; l'intensità sarebbe indipendente

dal numero delle coppie: se, al contrario, r è trascurabile rispetto a ρ, si ha:

$$I_1 = \frac{n\varepsilon}{\rho};$$

l'intensità sarebbe proporzionale al numero delle coppie.

Concludendo, la corrente sarà più intensa riunendo gli elementi elettromotori in serie, quando la resistenza esterna è grande; quando invece questa è piccola, la corrente sarà più intensa aggruppandoli in superficie. Per esempio, sarà preferibile la riunione in serie quando si tratta di linee telegrafiche, o di far passare la corrente nei tessuti organici che hanno grandissima resistenza; e in tal caso si potranno adoperare anche elementi di notevole resistenza interna, perchè questa sarà trascurabile rispetto alla esterna che è molto grande. Quando invece si tratta, come nella galvanocaustica, di arroventare un filo di ferro o di platino, converrà allora adottare la disposizione in superficie, e scegliere elementi di poca resistenza interna.

361. **Calore svolto dalla corrente; legge di Joule.** — Abbiamo detto che ogniqualvolta una quantità di elettricità q passa da un punto di potenziale V_1 ad un punto di potenziale minore V_2, v'è una diminuzione d'energia potenziale elettrica eguale a $q(V_1 - V_2)$; questa, pel principio della conservazione dell'energia, deve essere compensata da altrettanta energia sotto forma diversa, come, per es., un lavoro chimico (elettrolisi), un lavoro meccanico, o semplicemente calore. E poichè la corrente è un continuo passaggio di elettricità da punti di potenziale più alto a punti di potenziale più basso, se in un tratto qualunque del circuito esterno, supposto tutto metallico, essa non produce alcun la-

voro chimico o meccanico, deve dar luogo ad uno svolgimento equivalente di calore, il che è confermato dall'esperienza. Questo calore, come si è detto, deve essere in ragione della quantità di energia spesa nel tratto del circuito considerato; ossia, dicendo Δ la differenza di potenziale alle sue estremità, i la corrente, q la quantità di calore sviluppata in un secondo, e J l'equivalente dinamico del calore, deve essere:

(1) $$J q = \Delta i.$$

Ed essendo per la legge di Ohm $\Delta = i r$, dove r è la resistenza del tratto del circuito che si considera, si ha:

(2) $$J q = i^2 r.$$

Se si adottano le unità pratiche suddette, l'energia è espressa in joule; valutando q in piccole calorie, J risulta eguale a 4,2; cosicchè si ha:

(3) $$q = 0{,}24\, i^2 r,$$

la quale, facendovi $i = 1$ ed $r = 1$, esprime che 1 ampère, passando per un filo che ha 1 ohm di resistenza, vi svolge in 1 secondo 0,24 piccole calorie.

Joule con esperimenti calorimetrici ha appunto constatato, conformemente alla relazione (3), che il calore sviluppato in un dato tempo è proporzionale alla resistenza della porzione del circuito considerata e al quadrato dell'intensità della corrente. Per questa ragione la legge espressa dalla (3) è detta *legge di Joule*, e codesta trasformazione dell'energia elettrica in energia termica suole denominarsi *effetto Joule*, in onore del celebre fisico inglese.

E poichè anche i liquidi della pila offrono una resistenza al passaggio della corrente, vi si svolge, secondo la medesima legge di Joule, del calore.

Se il calore prodotto dalla corrente non si disperdesse per convezione e per irraggiamento, la temperatura di un conduttore andrebbe crescendo indefinitamente, ma a cagione di tale dispersione, essa raggiunge una temperatura costante, determinata dalla condizione che il guadagno di calore eguagli in ciascun istante la perdita.

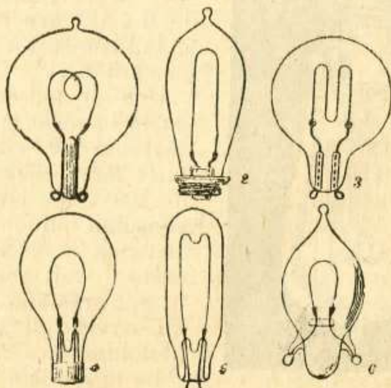


Fig. 410.

362. **Lampade elettriche a incandescenza.** — Deriva dalla legge di Joule che, componendo un circuito con fili grossi di rame e fili sottili di platino o di ferro, mentre i primi si scalderanno appena per il passaggio della corrente, i secondi si potranno arroventare fino all'incandescenza, e potranno anche fondere; questa deduzione, verificata dalla esperienza, insegna che, mentre la intensità

della corrente è la stessa in tutti i punti di un circuito semplice, la medesima cosa non succede del calore svolto.

Il calore prodotto nei fili conduttori della corrente, viene utilizzato, come si sa, nella illuminazione col mezzo delle *lampade ad incandescenza:* queste consistono in filamenti di carbone o metallici, chiusi in ampolle di vetro vuotate di aria, e resi luminosi dal calore che la corrente svolge: la fig. 410 mostra alcune di tali lampada a filamento di carbone.

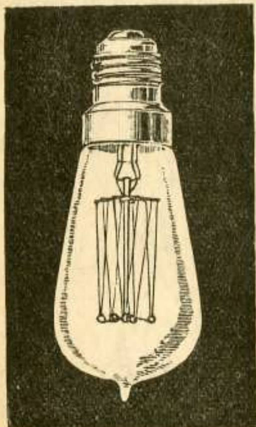


Fig. 411.

Una di tali lampadine da 16 candele, richiede la corrente di 0.5 ampère sotto la forza elettromotrice di 100 volta circa; essa consuma quindi l'energia elettrica di circa 50 watt, ossia 3 watt per candela in 1^s, e prestano in media un servizio di 700 ore di illuminazione.

Le lampade a filamento di carbone furono inventate da Edison.

Negli ultimi anni si è molto esteso l'uso di lampade a incandescenza con filamento metallico: tali lampade consumano, a parità di luce emessa, minore energia elettrica di quelle con filamento di carbone — poco più di un terzo —, e perciò sono più economiche. Il loro filo è costituito, a seconda delle varie specie, di osmio, o tantalio, o tungsteno; avendo però una resistenza specifica non molto

grande, deve essere di notevole lunghezza e quindi viene ripiegato più volte in varii modi (fig. 411).

Sebbene le lampade con filamento metallico siano di maggior prezzo di quelle col filamento di carbone, e i filamenti siano più fragili, nondimeno vi ha evidente convenienza economica nel loro uso. Oggi si costruiscono lampade con filamento metallico anche di grande intensità, 1000 e più candele, assai più comode per la illuminazione privata e pubblica delle lampade ad arco, le quali, richiedendo i regolatori, sono più delicate e costano di più; inoltre, dovendosi di volta in volta sostituire i carboni, occorre per esse un maggiore servizio.

La luce ad incandescenza ha una tinta gradevole, simpatica, di una stabilità e costanza veramente inappuntabile. Le lampade, per mancanza dei prodotti della combustione, non viziano l'aria, non guastano le dorature, le pitture, ecc., che sono invece alterate dal gas illuminante; esse poi versano negli ambienti, a parità di illuminazione, molto minor calore delle lampade a gas. I pericoli d'incendio sono molto diminuiti, poichè se l'ampolla di vetro si rompe, il tenue filamento incandescente, messo in contatto coll'aria, brucia in un attimo, ed è improbabile che possa seguirne qualche inconveniente oltre all'estinzione della lampada. Bisogna però aver cura somma nelle istallazioni, che sia evitata la possibilità di corti circuiti: a questa circostanza si devono quasi tutti gli incendi accaduti con la corrente elettrica.

L'intensità luminosa di ciascuna lampadina rispondente al bisogno, la possibilità di attuarne un numero assai grande con uno stesso elettromotore, la facilità con la quale si può aumentare e diminuire l'illuminazione accendendo o estinguendo le lampade di un gruppo senza disturbare le lampade

di un altro, e gli altri pregi ricordati, danno ragione della rapida diffusione della illuminazione elettrica. Tutto ciò che riguarda questa industria è stato in pochi anni talmente perfezionato, da destare nel complesso vera meraviglia. Bisogna però riconoscere che la illuminazione a gas, in grazia delle reticelle Auer, ha fatto un grande progresso anch'essa, ed è diventata una concorrente formidabile dell'illuminazione elettrica a incandescenza. Anche la luce di un becco Auer è fissa, simpatica ed economica; se ha l'intensità di un 50 candele, consuma 120 litri circa di gas all'ora, e perciò, co' prezzi ordinari del gas, non costa più di 3 centesimi all'ora, mentre la luce di una lampadina elettrica di pari intensità luminosa, anche se a filamento metallico, costa un po' più.

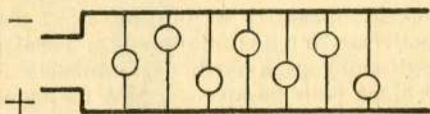


Fig. 412.

363. **Distribuzione delle lampade a incandescenza.** — Le lampade ad incandescenza sono ordinariamente distribuite in derivazioni parallele (fig. 412). In tale sistema, affinchè la corrente si distribuisca egualmente alle singole derivazioni trasversali, è necessario che la differenza di potenziale nei punti di derivazione si mantenga pressochè costante. A tal fine occorre che il potenziale non cada troppo velocemente lungo i due *reofori distributori* principali della corrente, i quali perciò devono avere piccola resistenza; ne nasce che la loro sezione deve essere piuttosto grande, e quindi

non possono molto estendersi a cagione della forte spesa per il rame. Inoltre, riuscendo essi molto pesanti, specialmente se la distribuzione è fatta a molte lampade, bisogna collocarli sotterra, e isolarli bene entro canne di terraglia, o cassette di legno spalmate di catrame.

364. **Luce elettrica.** — Non bisogna confondere la illuminazione a incandescenza con *la luce elettrica* propriamente detta che brilla fra le punte di due verghette di carbone, inserite nel circuito di un sufficiente elettromotore. La prima prova fu fatta da Davy nel 1810 con una poderosa pila del Volta: si suol ripetere l'esperimento con l'apparato della fig. 413, e basta una pila di un 30 elementi Bunsen di grandi dimensioni. Affinchè la lampada si accenda, è necessario che le punte dei carboni siano in principio in contatto; una volta però che le estremità sono rese incandescenti, si staccano di alcuni millimetri, e la corrente seguita a passare sotto la forma di un arco vaporoso ad altissima temperatura, formato in gran parte da vapore di carbonio. Non si può esaminare direttamente l'arco perchè l'occhio resta offeso dal suo grande splendore; si può però osservare proiettandone un'imagine reale col mezzo di una lente (fig. 414).

Il carbone positivo si consuma più del negativo, e diventa crateriforme: la temperatura di questo cratere fu stimata da Violle di 3500°, e corrisponde alla temperatura di vaporizzazione del carbonio; quasi tutti i corpi vi si fondono e volatizzano. Il carbone negativo ha una temperatura alquanto minore; l'arco invece l'ha superiore; tuttavia la maggiore quantità di luce irraggiata da questa lampada è dovuta, in grazia del maggiore potere emissivo del carbone, alle punte incandescenti di questo, e specialmente alla positiva: la luce bianchissima

dei carboni è un po' modificata da quella violacea dell'arco, così da assumere una tinta leggermente azzurrognola. Si sono poi inventati ingegnosi regolatori automatici che servono a portare i carboni a contatto quando la lampada è spenta, a riavvicinarli mano a mano che si consumano, mantenendoli ad una distanza fissa, affinchè la luce sia costante e l'arco non si spenga.

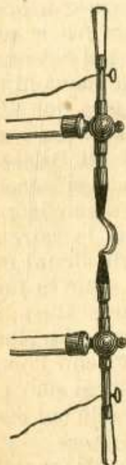


Fig. 413

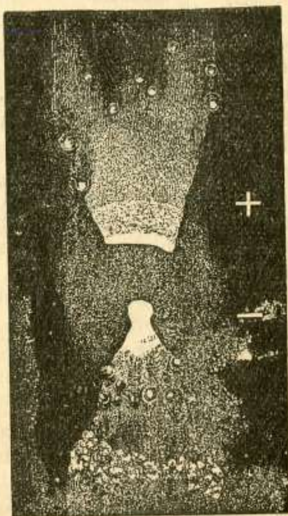


Fig. 414.

Davy impiegò, come si è detto, il carbone comune; più tardi Foucault lo sostituì col carbone da storta che, oltre a consumarsi più lentamente, presenta minor resistenza e quindi permette di adoperare una corrente di minore intensità. Oggi

sono numerose le fabbriche de' carboni artificiali che riescono più puri, più omogenei, e di una forma più regolare. Questi carboni sono ordinariamente fabbricati con una pasta formata da coke in polvere finissima, da nero di fumo e da uno sciroppo spesso di gomma e di zucchero. Il tutto è ben mescolato, compresso, passato alla trafila, seccato ed indurito ad alta temperatura. Poichè negli archi alimentati con corrente continua il consumo del carbone positivo è all'incirca doppio di quello negativo, si prende il primo più grosso: per gli archi medi i carboni più adatti sono di 10-12 millimetri, e si consumano in ragione di 4 a 5 centimetri all'ora con un arco di 5 millimetri; il quale, per ben stabilirsi e mantenersi, richiede una differenza di potenziale di circa 42 volta, e una corrente di 8 ampère; ciò implica un consumo di energia elettrica di 336 watt, e come correspettivo si ottiene una luce di un 50 carcel. Una bella luce di un 100 carcel richiede almeno un'intensità di 15 ampère e una differenza di potenziale di 50 volta ai carboni, ossia un consumo di energia di 750 watt circa.

Se la forza elettromotrice non è maggiore di una trentina di *volta*, l'arco non si può formare, come se per la disaggregazione del carbone si destasse fra le punte una forza elettromotrice contraria. Difatti, se si misura col mezzo di un voltometro la differenza di potenziale fra i due carboni, si trova che essa non è mai inferiore a 30 volta, e varia da 30 a 70 volta. Tale caduta del potenziale che si produce nel senso della corrente, si compone di due parti, analogamente a quanto succede nel voltametro: una fissa, indipendente dall'intensità della corrente e dalla distanza dei carboni, che si comporta per conseguenza come una forza elettromotrice inversa o di polarizzazione; l'altra che varia

coll'intensità della corrente e la distanza dei carboni, ossia con la lunghezza dell'arco, ed è dovuta alla resistenza del mezzo interposto secondo la legge di Ohm.

365. **Correnti termoelettriche.** — Occupiamoci ora brevemente del fenomeno reciproco, vale a dire della trasformazione dell'energia termica in energia elettrica.

In un circuito metallico, le cui parti siano tutte alla medesima temperatura, la somma delle forze elettromotrici è nulla, e non vi esiste corrente alcuna (§ 340). Ma l'esperienza dimostra che si produce una corrente, se a comporre il circuito entrano metalli diversi, e si riscalda una saldatura: questo fatto interessante fu scoperto da Seebek nell'anno 1823.

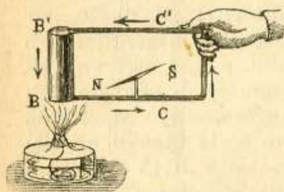


Fig. 415.

Consideriamo un circuito di due metalli, rame e ferro, per esempio; una delle saldature essendo alla temperatura t_1 dell'ambiente, scaldiamo l'altra alla temperatura t_2; si produce un flusso continuo di elettricità o una *corrente termoelettrica*, che va dal rame al ferro passando per la saldatura calda, come può verificarsi inserendo un galvanometro nel circuito. Diremo che il ferro è *positivo* rispetto al rame, e questo *negativo* rispetto al primo. La fig. 415 mostra una coppia termoelettrica rame-bismuto.

In generale diremo *termoelettrico positivo* rispetto all'altro, il metallo verso cui si dirige la corrente attraverso alla saldatura calda: nella serie seguente i metalli sono ordinati in modo che ciascuno è positivo rispetto ai precedenti, e negativo rispetto

ai successivi: così il rame è positivo rispetto al bismuto, e negativo rispetto all'antimonio.

—	Bismuto, ...	da 89	a 97
	Cobalto.	22	
	Argentone (pakfong) . . .	11,75	
	Mercurio	0,418	
	Piombo	0	
	Stagno	0,10	
	Rame del commercio. . .	0,10	
	Platino	0,9	
	Oro	1.20	
	Argento puro	3,00	
	Zinco puro	3,7	
	Rame elettrolitico	3,8	
	Ferro (fili di pianoforte). .	17,5	
+	Antimonio cristallizzato .	da 22,6	a 36,4
	Selenio.	807.	

Il numero registrato accanto ad ogni metallo esprime in *microvolta* la forza elettromotrice di una coppia formata con quel metallo e col piombo, per una differenza di temperatura di 1°, fra 19°,5 e 20°,5 *C:* tale forza elettromotrice è detta il *potere termoelettrico* del metallo rispetto al piombo, alla temperatura di 20°.

Il potere termoelettrico di un metallo rispetto a un altro qualunque, alla temperatura suddetta, si ottiene prendendo la differenza dei loro poteri termoelettrici rispetto al piombo: se questa risulta positiva, il primo metallo sarà positivo rispetto al secondo.

Per certe coppie la corrente va aumentando in modo continuo, mano a mano che si eleva la temperatura della saldatura calda: invece con la coppia rame-ferro suddetta, la corrente raggiunge un massimo, poi decresce, diviene nulla, e finalmente cambia di senso, il rame diventando *positivo* rispetto al ferro.

Questo fatto dell'*inversione della corrente termoelettrica* si può verificare facilmente chiudendo il circuito di rame di un galvanometro con un filo di ferro, tenendo costante la temperatura di una giuntura ed esponendo l'altra al calore di una fiamma: prima del calor rosso la corrente raggiunge un massimo; poi, seguitando lo scaldamento, essa diminuisce fino ad annullarsi, e finalmente s'inverte.

La temperatura alla quale accade l'*inversione della corrente* dipende da quella della saldatura fredda; talchè per ogni valore di questa vi corrisponde un valore dell'altra, per cui non v'ha corrente nel circuito, essendo le forze elettromotrici dalle due parti eguali e contrarie. Nella coppia rame e ferro sussiste questo equilibrio per le temperature di 0° e 550° *C*, e in generale per $t + s = 550°$. Se la somma delle due temperature è minore di 550°, la corrente va dal rame al ferro per la saldatura calda; se è maggiore va in verso contrario. È certamente minore quando entrambe sono minori di $550° : 2 = 275°$, e allora sarà il ferro positivo rispetto al rame; quando invece entrambe superano i 275°, sarà il rame positivo rispetto al ferro.

366. **Pila termoelettrica.** — Congiungendo di seguito più coppie termoelettriche eguali, per modo che le loro forze elettromotrici si sommino, si ha una *pila termoelettrica*. A tale uopo le asticciuole dei due metalli scelti per formare la pila, si dispongono l'una a fianco dell'altra, alternando a vicenda i due metalli, e saldando i capi di ciascuna con l'antecedente e il susseguente (fig. 416). Così le giunture di ordine dispari riescono schierate da una parte, quelle di ordine pari dall'altra. I due metalli della pila termoelettrica del Nobili sono il bismuto e l'antimonio; questi corpi per una stessa

differenza di temperatura, danno luogo ad una forza elettromotrice maggiore (§ 365): riscaldando un ordine di saldature e tenendo freddo l'altro, la forza elettromotrice che ne nasce è proporzionale al numero delle copie, e, entro certi limiti, alla differenza di temperatura de' due ordini suddetti di saldature.

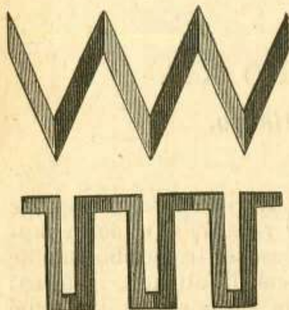


Fig. 416.

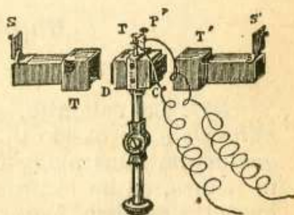


Fig. 417.

La pila termoelettrica del Nobili (fig. 417) serve egregiamente allo studio del calore raggiante (§ 257): e aggiungeremo l'osservazione che, essendo la resistenza di queste pile ben piccola, sarà vantaggioso di adoperare con esse galvanometri di piccola resistenza.

CAPITOLO XII.

Magnetismo.

367. **Le calamite.** — La *calamita* o *magnete naturale* è un ossido di ferro ($Fe_3\ O_4$), detto *magnetite* dai mineralogisti: esso si trova abbondante in natura, ed ha la proprietà di attirare il ferro: questa proprietà però non la possiede in egual grado in tutti i suoi punti. Quando si rotola una calamita naturale sulla limatura di ferro, si vede che questa si ammassa in ciuffi di preferenza in certi punti.

Strisciando uno di tali punti sopra un pezzo di acciaio, questo si calamita a sua volta, acquista cioè la proprietà di attirare il ferro: la calamita di acciaio così formata è detta *calamita artificiale*, per distinguerla da quella naturale.

L'esperienza dimostra d'altra parte che le proprietà loro sono identiche; si adoperano perciò le sole calamite artificiali, come quelle che hanno una forma più semplice e regolare. Tale forma è ora quella di una sbarra parallelepipeda, ora quella di un cilindro, o di una losanga allungata come un ago.

Se si tuffa una sbarra calamitata nella limatura di ferro, questa aderisce in maggior copia verso

le estremità, e punto verso il mezzo (fig. 418). Tali punti dove l'azione attrattiva è massima, sono i *poli;* essi sono separati da una zona neutra, che è quella dove la calamita non attira la limatura di ferro.

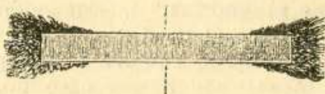


Fig. 418.

Dal punto di vista dell'attrazione della limatura, nulla distingue i due poli; ma se si sospende orizzontalmente una sbarretta calamitata, sia col mezzo della staffa *C* portata da un filo (fig. 419), sia appoggiandola su una punta verticale (figura 420), si vede

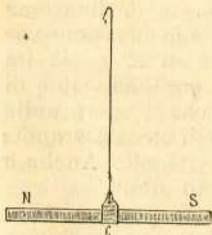


Fig. 419.

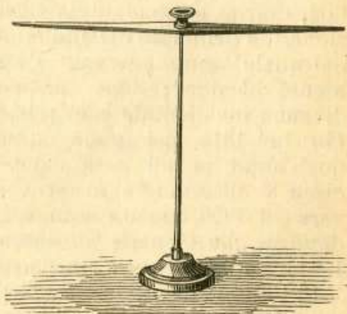


Fig. 420.

che uno dei suoi estremi, e sempre lo stesso, si rivolge costantemente al nord. I due poli dunque, per questa proprietà, si distinguono uno dall'altro; è detto *polo nord* quello che si volge al nord, *polo sud* quello che guarda a mezzodì. Si chiama poi

asse magnetico la retta che unisce i due poli, *meridiano magnetico* il piano verticale che passa per l'asse magnetico, quando l'ago è in equilibrio sotto la sola azione della terra.

368. **Magnetismo terrestre. — Declinazione e inclinazione magnetica.** — Sospendendo un ago calamitato, nel modo detto dianzi, in guisa cioè che esso possa liberamente ruotare in un piano orizzontale, si osserva che il suo asse non si dirige esattamente da nord a sud; l'angolo che il meridiano magnetico fa col meridiano astronomico, si chiama *declinazione magnetica.* Essa si distingue in *orientale* ed *occidentale,* secondo che il polo nord si dispone ad est o ad ovest del meridiano geografico. La declinazione ha un diverso valore da un luogo all'altro, e va soggetta a variazioni secolari, diurne e accidentali. Così a Parigi la declinazione, da principio orientale, divenne nulla nel 1663, nel quale anno pertanto l'ago era diretto esattamente al nord; dopo tale epoca, la declinazione divenne occidentale e acquistò il suo massimo valore nel 1814, nel quale anno era di 22° e 34′. Da quell'anno in poi essa decresce continuamente di circa 8′ all'anno, e si prevede che tornerà nulla verso il 1990, con un *semiperiodo* di circa 330 anni; dopo di che tornerà ad essere orientale. Anche a Londra furono osservate variazioni simili.

In Italia la declinazione, al presente, è pure occidentale, ma decresce continuamente come a Parigi, e tutto lascia supporre che verrà un'epoca in cui sarà zero, e dopo diverrà orientale. A Milano, attualmente (an. 1916), la declinazione è di 9°,24′ e diminuisce di 7′ circa all'anno.

Le variazioni a corto periodo sembrano dipendere dal movimento apparente del sole: esse superano di rado i 0°,10′, e il polo nord si sposta come se

fuggisse il sole nel suo moto apparente intorno alla terra. Pare che anche la luna abbia una certa influenza su questa variazione diurna.

Le *variazioni accidentali* si producono simultaneamente su una gran parte della superficie terrestre, e sembrano in connessione diretta colle aurore boreali, le quali sono certamente dovute a scariche elettriche nelle alte regioni dell'atmosfera. La frequenza delle aurore boreali e la loro grandiosità paiono poi in relazione colla frequenza e con la estensione delle macchie solari. L'ago magnetico prima, durante, e dopo un'aurora polare, è in preda a forti perturbazioni; cioè esso risente una *burrasca magnetica.*

Arago soleva dire che, solamente a osservare le gravi perturbazioni dell'ago magnetico, si poteva con sicurezza predire un'aurora boreale, non però sempre visibile sul nostro orizzonte.

Le perturbazioni dell'ago coincidono poi sempre con qualche sconvolgimento straordinario che si osserva alla superficie del sole; il che fece dire all'astronomo Volf, che l'ago magnetico fa l'ufficio del polso del sole!

Questi fenomeni sono così interessanti che oggi in molti Osservatori si fa sistematicamente, ad ore fisse, l'osservazione della declinazione; le piccole variazioni vengono ingrandite col mezzo di un raggio luminoso riflesso da uno specchietto solidamente connesso col magnete (§ 321): ed anzi si fa anche la registrazione continua per mezzo della fotografia, accogliendo il raggio riflesso su un foglio di carta sensibile alla luce, il quale è fatto scorrere nel senso verticale, e con moto uniforme, da un congegno di orologeria.

Fin qui si è supposto che l'ago calamitato fosse libero di girare soltanto in un piano orizzontale; ma

se noi sospendiamo, prima che sia calamitata, una sbarretta pel suo centro di gravità, in modo che possa prendere intorno a questo tutte le possibili orientazioni, vedremo che, dopo aver subito la calamitazione, essa si dispone costantemente col suo asse nel meridiano magnetico, e nel nostro emi-

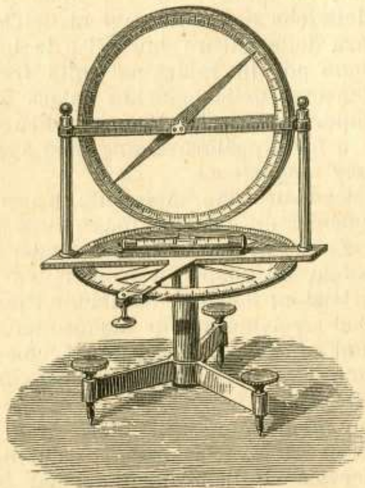


Fig. 421.

sfero avrà il polo nord al di sotto del piano dell'orizzonte. Nell'emisfero australe invece è il polo sud dell'ago sospeso nel modo ora detto, che guarda sotto il piano orizzontale. L'angolo che fa l'asse magnetico dell'ago con il piano dell'orizzonte, si chiama *inclinazione magnetica.* La fig. 421 rappresenta una bussola d'inclinazione: il piano del cerchio verticale deve trovarsi esattamente nel meridiano magnetico.

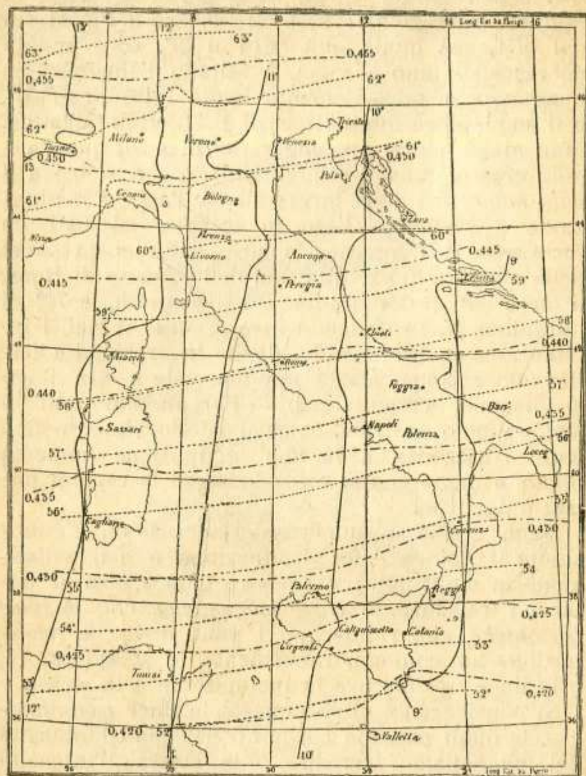
Anche l'inclinazione è diversa da un luogo all'altro, e nello stesso luogo va soggetta a variazioni regolari e irregolari: essa si osserva a Parigi sin dal 1671, nel quale anno era di 75°, ed è andata decrescendo sino ad oggi. A Milano l'inclinazione magnetica è presentemente (anno 1916) di 61°,51′, e il suo valore diminuisce di 1′,33 circa all'anno. Man mano che si procede verso il nord, quest'angolo cresce, finchè raggiunge 90° dove si trova il *polo magnetico* della terra; allora l'ago d'inclinazione è verticale. Esso fu trovato nel 1831 da Sir Cross nell'America polare, sulla costa ovest della Boothia-Felix, alla fine dello stretto di Roos, a circa 96° di longitudine da Greenwich, e 70° di latitudine *N*. Procedendo invece verso il sud, l'inclinazione va diminuendo, finchè in prossimità dell'*equatore magnetico* si annulla, vale a dire l'ago si dispone orizzontalmente. Poi andando più al sud, è il polo australe, come si è detto, che s'inclina sotto l'orizzonte, e la sua inclinazione aumenta mano a mano che si procede verso le regioni polari antartiche.

Oggi, grazie a numerose osservazioni, è conosciuto il valore della declinazione e dell'inclinazione in molti punti del nostro globo; così si poterono tracciare le *carte magnetiche*, con le *linee isogoniche* che riuniscono i punti dove la declinazione ha contemporaneamente lo stesso valore, e le linee *isocline* ove la inclinazione è la stessa.

Si considerano, oltre a queste, le linee *isodinamiche*, le quali passano pei punti nei quali l'intensità del magnetismo terrestre è la stessa; l'intensità vien misurata con metodi e apparecchi che qui non possiamo descrivere.

Le linee isogoniche hanno, all'ingrosso, l'andamento dei meridiani; le isocline quello dei paral-

CARTA MAGNETICA D'ITALIA INTORNO AL 1892.



——— *Isogone* .... *Isocline* —·—·— *Isodinamiche*

Fig. 422.

leli. La isoclina che passa pei luoghi ove la inclinazione è nulla, è detta *equatore magnetico.* La fig. 422 rappresenta la carta magnetica dell'Italia, qual'era intorno al 1892, secondo l'Ufficio Centrale di Meteorologia a Roma: in essa oltre le linee isogoniche e isocline, sono tracciate anche le linee isodinamiche. Il magnetismo può subire da circostanze locali gravi perturbazioni: per esempio, nelle vicinanze di Roma, di Napoli, nella regione Etnea, insomma in tutta la zona vulcanica, si possono trovare variazioni sensibilissime degli elementi del magnetismo terrestre a piccole distanze.

Con carte simili a queste, ma tracciate su una scala maggiore, il navigante guardando la bussola, può dirigere la rotta a suo talento; si crede che la bussola fosse conosciuta dai Cinesi, ma è certo che a Flavio Gioia d'Amalfi spetta il merito di averla per primo introdotta nella navigazione, verso il principio del secolo XIV.

369. **Bussola marina.** — La fig. 423 rappresenta la bussola marina oggidì più in uso; il per-

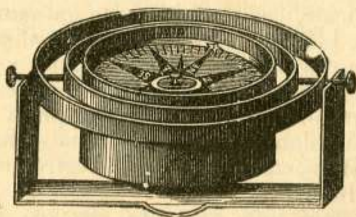


Fig. 423.

nio su cui, per mezzo di un cappelletto di agata, gira l'ago di declinazione, è fissato sul fondo di una scatola cilindrica zavorrata; questa è sospesa col

sistema cardanico, acciocchè il pernio rimanga sempre verticale e l'ago orizzontale, comunque s'inclinino i sostegni. All'ago poi è fissato un disco di cartoncino o di mica, dove è segnata la rosa dei venti divisa in 32 rombi; girando esso con l'ago, il diametro segnato NS si dirige precisamente da Nord a Sud, qualora il disco sia stato fissato all'ago in modo che la direzione NS faccia con l'ago magnetico l'angolo della declinazione del luogo dove la bussola viene adoperata.

Per eliminare poi l'azione perturbatrice che il ferro della nave esercita sull'ago, si collocano opportunamente presso alla bussola masse di ferro compensatrici.

370. **L'azione della terra su una calamita si riduce ad una coppia.** — Un ago di acciaio pesa lo stesso prima e dopo la calamitazione; inoltre, sospendendolo a un filo di seta, questo assume esattamente la direzione verticale. Tali esperienze provano che l'azione della terra su di una calamita non si riduce ad una forza, perchè in tal caso questa ammetterebbe una componente orizzontale e una verticale, cosa contraddetta dai fatti ora riferiti; se ne conchiude che l'azione in discorso non può essere dovuta che ad una coppia, a due forze cioè eguali, parallele e contrarie applicate a due punti invariabilmente uniti. Questi punti precisano i *poli* della calamita: se la calamita è una sbarra, essi non si trovano proprio all'estremità, ma un poco nell'interno.

Siccome poi una calamita girevole intorno al centro di gravità è in equilibrio quando il suo asse è diretto secondo l'ago di inclinazione, si vede che il campo terrestre ha questa direzione: si può ritenerlo uniforme nei limiti di una stanza.

Rappresentiamo in direzione e grandezza con NR

e SR' le due forze con le quali la terra sollecita i due poli, e decomponiamo ciascuna di esse in due componenti, una verticale e l'altra orizzontale (fig. 424): si vede che l'ago è sollecitato da due coppie, una orizzontale (NU, SU'), l'altra verticale (NV, SV'); la prima è soddisfatta, ossia il suo momento è nullo, quando l'asse dell'ago è nel meridiano magnetico; la seconda quando esso si dispone in questo piano secondo l'ago di inclinazione. Se pertanto si vuole che l'asse magnetico dell'ago di declinazione resti orizzontale (fig. 420), bisogna fare equilibrio alla coppia verticale scegliendo il punto di sospensione non nel centro di gravità, ma un poco verso N: così difatti è sospeso l'ago di declinazione, il quale allora può considerarsi soggetto alla sola coppia orizzontale. Questa avrà il momento massimo quando l'asse della calamita è perpendicolare al meridiano magnetico, e un momento nullo quando l'asse è nel detto meridiano.

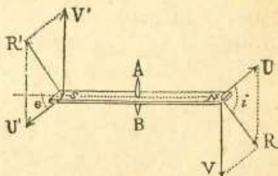


Fig. 424.

371. **Azioni reciproche tra le calamite.** — Se al polo nord di un ago di declinazione si avvicina il polo nord di una calamita, si vede che lo respinge; lo stesso polo nord attira invece il polo sud dell'ago. Analogamente, il polo sud della calamita attira il polo nord, e respinge il polo sud della sbarretta mobile. Dunque, *due poli magnetici dello stesso nome si respingono, e due poli di nome contrario si attirano.*

Lo stesso Coulomb che scoprì la legge delle forze elettriche, misurando in modo analogo codeste azioni

magnetiche, ha trovato che *esse variano in ragione inversa del quadrato della distanza.* Ma l'azione che si esercita fra due poli, oltre che dalla loro distanza, dipende anche dal grado di magnetizzazione delle calamite, o, come si dice, dall'*intensità dei poli.* Vale a dire, se sopra un dato polo posto a una distanza fissa, il polo di una calamita esercita un'azione doppia, tripla... di quella che vi esercita il polo omonimo di un'altra calamita, si dirà che l'intensità del polo della prima calamita è doppia, tripla, ecc. dell'intensità del polo della seconda.

Dicendo pertanto m e m' le intensità dei due poli, F la forza con la quale si respingono o si attraggono, d la loro distanza, sarà, essendo k una costante:

$$F = \pm k \frac{m\,m'}{d^2}.$$

Se i due poli sono dello stesso nome, l'espressione della forza è positiva, ed essi si respingono; nel caso opposto, m ed m' avendo segno contrario, la forza è negativa e i poli si attirano.

Adottando il sistema (C. G. S.) la forza si misura in dine, la distanza in centimetri: si sceglie poi l'unità di magnetismo in modo che k sia uguale all'unità; cosicchè la formula diventa più semplicemente:

$$F = \pm \frac{m\,m'}{d^2}.$$

Se ne deduce che il *polo uno* è quello che ne respinge uno eguale, alla distanza di 1 cm., con la forza di una dina.

Si conviene di considerare come positivo il polo nord. L'intensità di un polo si suole poi comunemente attribuire ad una *quantità di magnetismo* in esso raccolta ed espressa dallo stesso numero m.

Il valore della componente orizzontale terrestre, ossia della forza magnetica con cui la terra sollecita orizzontalmente un polo *uno*, a Milano è, presentemente, 0,02195 (C. G. S.); e secondo una formula del prof. Chistoni, si può ritenere che aumenti di 0,00024 all'anno.

372. **Campo magnetico.** — Chiamasi *campo magnetico* lo spazio ove sono sensibili delle azioni magnetiche: *la direzione e l'intensità del campo* in un punto sono date dalla direzione e dall'intensità della forza che solleciterebbe l'unità di magnetismo supposta in quel punto.

L'intensità di un campo magnetico si misura in *gauss* [1]: si dice che in un punto il campo è di un gauss se l'unità di magnetismo supposta in quel punto è sollecitata a muoversi con la forza di una dina.

E poichè la legge fondamentale delle azioni magnetiche è identica a quella delle azioni elettriche, s'intende subito che ai fenomeni magnetici si può applicare il concetto del potenziale, e che le proprietà del campo elettrico spetteranno pure al campo magnetico.

Così si potrà parlare, oltre che di forza e di potenziale magnetico, anche di superficie equipotenziali o di livello, di linee di forza magnetica, ecc.

Un campo magnetico è uniforme, se in ogni punto la forza magnetica ha la stessa direzione e intensità. Tale è, per esempio, il campo terrestre nei limiti di una stanza: esso ha la direzione dell'ago di inclinazione. Un piccolo ago magnetico che si trovi in un campo uniforme, è soggetto all'azione di due forze eguali e contrarie, applicate

---

(1) Da Gauss, sommo matematico tedesco.

ai due poli, le quali costituiscono una coppia. Questa orienterà l'ago in modo che il suo asse magnetico si disponga nella direzione del campo.

Se il sistema delle forze si riduce a una coppia, e l'azione è puramente direttrice, ciò vuol dire che le quantità di magnetismo dei due poli (intensità dei poli) sono eguali e contrarie; talchè *per ogni calamita la somma algebrica delle quantità di magnetismo è nulla.*

Si chiama *momento magnetico* di una calamita il prodotto $m\,l$ dell'intensità dei poli per la loro distanza.

373. **Induzione magnetica.** — Si verifica col ferro un fenomeno di influenza o induzione magnetica simile a quello dell'influenza elettrica. Verifichiamo subito che un pezzo di ferro in un campo magnetico, diventa per induzione una calamita; ossia che nella parte più vicina al polo inducente si desta un polo di nome contrario, e un polo dello stesso nome nella parte più lontana.

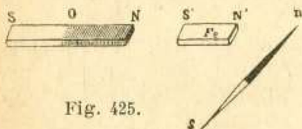


Fig. 425.

Per convincerci della cosa collochiamo una sbarretta di ferro non magnetizzata $S'\,N'$ (fig. 245) presso ad un ago calamitato sospeso orizzontalmente, e assoggettiamola alla influenza di un polo della calamita $S\,N$ abbastanza lunga per poter trascurare l'influenza dovuta al polo più lontano. Si vedrà respinto uno dei poli dell'ago di declinazione e attratto l'altro; questo prova che la sbarretta di ferro $S'\,N'$ diventa *temporaneamente* una calamita, finchè è soggetta all'azione del magnete $S\,N$; e guardando al nome dei poli vicini, si constata che essa acquista un polo di nome contrario al polo inducente nella parte più vicina, e

un polo dello stesso nome nella parte più lontana. In generale, ogni particella di ferro che si trova in un campo magnetico diventa un magnete elementare, con l'asse orientato secondo la direzione che ha la forza magnetica in quel punto. Si profitta di questo fatto per esplorare il campo: se, per esempio, si tratta del campo dovuto a una calamita, poniamo sopra di essa un cartoncino od una lastra di vetro, e facciamoci cadere della limatura di ferro con uno staccio: in ciascun punto del campo le particelle di ferro risentiranno l'indu-

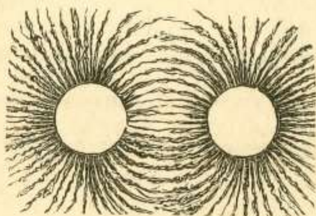


Fig. 426.

zione, e si disporranno secondo le linee di forza magnetica, costituendo quello che si chiama uno *spettro magnetico*. Giova scuotere dolcemente la lastra per aiutare i granellini di ferro a disporsi secondo le linee di forza.

La fig. 426 rappresenta la disposizione di codeste linee nel campo dovuto a una calamita avente forma di ferro di cavallo: si ritiene che le linee di forza all'esterno, cioè nell'aria, siano dirette dal polo nord al polo sud.

374. **Magneti elementari; distribuzione solenoidale e lamellare.** — Fin qui abbiamo ragionato come se una calamita si riducesse a due soli cen-

tri di forza, i due poli; ma non si deve credere che in questi soli punti hanno sede le proprietà magnetiche: ciascuna particella di una calamita è, come ora vedremo, una calamita elementare, e i poli non sono altro che i punti di applicazione delle forze risultanti. Un polo non si trova difatti mai separato dall'altro: spezziamo nel mezzo un ago calamitato, e constateremo che ciascuna metà sarà una nuova calamita con i suoi due poli separati dalla linea neutra, come si può provare facendola agire su un ago di declinazione o tuffandola nella limatura di ferro. Si potranno spezzare le due calamite così

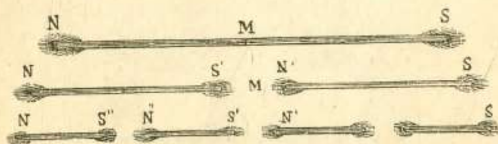


Fig. 427.

ottenute, e il risultato sarà lo stesso; si otterranno cioè quattro magneti, ciascuno con i suoi due poli separati dalla linea neutra (fig. 427). È logico quindi ammettere, per deduzione, che le ultime particelle di una calamita siano esse stesse polarizzate; e perciò un magnete si può considerare costituito da tanti *magneti elementari*, i quali con le loro relative orientazioni determinano le proprietà del campo. Anzi si è andati più oltre, giacchè si suppone molto verosimilmente che la polarità magnetica esista già in ogni atomo di ferro (e di pochi altri corpi magnetici, come l'acciaio, la ghisa, il nichel, il cobalto), prima anche che il ferro sia trasformato in calamita: con la calamitazione una gran parte de' detti atomi si orienta con gli assi paralleli, e con i poli

dello stesso nome dalla medesima parte; donde la proprietà della calamita.

Supponiamo ora che tutti questi magneti elementari identici siano disposti l'uno dopo dell'altro in fila, con i poli nord rivolti dalla stessa parte, e i poli sud dall'altra; si ha allora un *filetto solenoidale;* e poichè le azioni esercitate verso l'esterno dai singoli poli si elideranno a due a due, rimarranno efficaci soltanto le intensità dei due poli estremi. Il campo dovuto a questo solenoide dipenderà unicamente dalla posizione dell'estremità, e sarà indipendente dalla forma e dalla lunghezza; e se gli estremi vengono a toccarsi, si ha allora un *solenoide chiuso* che non eserciterà alcuna azione all'esterno.

Un gran numero di calamite si possono considerare come formate da fasci di solenoidi: l'insieme de' poli de' singoli solenoidi forma il *magnetismo libero* che si manifesta con segni contrarii, ma con eguale intensità, in regioni opposte del magnete.

Ma possiamo immaginare un secondo modo di distribuzione de' magneti elementari: si può cioè supporre che questi siano messi l'uno di fianco all'altro su una superficie qualunque, in modo che i loro assi siano normali a questa superficie, e i poli dello stesso nome tutti rivolti dalla stessa parte; il sistema costituisce allora una *lamina magnetica.* Le calamite lamellari si possono ritenere come composte dalla sovrapposizione di tante lamine diverse.

Ci rendiamo ora conto della magnetizzazione per influenza nel modo seguente: quando un pezzo di ferro è introdotto nel campo, i magneti elementari ubbedendo all'azione della forza in quel punto tendono a disporsi co' loro assi nella direzione

del campo. Se questo si annulla, o si ritira il ferro dal campo, le forze molecolari riconducono i magneti elementari a quella orientazione primitiva irregolare per cui veniva dissimulata la loro polarità, e il ferro perde la calamitazione che aveva acquistato. Avviene qualche cosa di simile ne' dielettrici che si trovano in un campo elettrico; ma mentre questi ultimi si polarizzano perchè avviene in ogni loro punto un vero spostamento di elettricità, il ferro si polarizza, magnetizzandosi, soltanto per la orientazione de' magneti elementari già esistenti.

Se però il ferro non è puro, ossia non è ferro dolce, ovvero si tratta di ghisa, di acciaio specialmente se temprato, la calamitazione è più lenta a stabilirsi e meno intensa durante l'induzione, ma permane in gran parte al cessare di questa. Tale è l'origine delle calamite artificiali: si dice *magnetismo temporaneo* quello che esiste soltanto durante l'induzione; *magnetismo rimanente* quello che persiste cessata l'induzione.

È detta *forza coercitiva* la proprietà che possiedono certe varietà di ferro di conservare dopo l'induzione una parte del magnetismo. La si attribuisce a una specie di attrito interno che si oppone fino a un certo limite, alle modificazioni che una causa qualunque tende a produrre nello stato magnetico.

Vedremo in appresso che i più intensi campi magnetici si ottengono per mezzo delle correnti elettriche, cosicchè si ricorrerà a queste quando si vogliano fabbricare calamite potenti: qui vogliamo solo descrivere brevemente alcuni metodi più comunemente usati per calamitare.

375. **Metodi per calamitare.** – Per calamitare un pezzo di ferro basta collocarlo in un campo

magnetico; se si tratta d'una sbarra, bisogna disporla con la sua lunghezza secondo la direzione del campo. Così se per qualche tempo, si tiene una sbarra di ferro nella direzione dell'ago d'inclinazione, essa si calamita per azione della terra, e questo spiega perchè si trovano molto frequentemente pezzi di ferro calamitati. La calamitazione si fa più agevolmente percuotendo la sbarra; con la percussione si aiutano le particelle a vincere la *forza coercitiva* e ad orientarsi secondo la forza magnetizzante. In ogni caso, la calamitazione è più forte, se il campo è più intenso.

Tutto ciò è chiaro se si ricorda quello che abbiamo detto innanzi, che cioè i fenomeni magnetici si spiegano ammettendo che le particelle di un corpo magnetico siano altrettante calamite elementari belle e formate. Allora, se il corpo magnetico non risente alcuna forza magnetizzante, i magneti elementari hanno i loro assi diretti in tutti i sensi, e la risultante delle azioni loro in un punto esterno è nulla; ma quando viene posto in un campo magnetico, gli assi delle calamite elementari tendono tutti ad orientarsi secondo la direzione della forza magnetizzante, vincendo la forza coercitiva. Lo stato di saturazione magnetica sarà raggiunto, quando tutti i magneti elementari si saranno orientati.

Se si tratta di ferro dolce, poichè la forza coercitiva vi ha un piccolo valore, i magneti elementari si orientano assai facilmente in un campo anche debole; ma poi, quando il ferro è tolto dal campo, essi si disorientano con la stessa facilità, e il corpo perde tutta o quasi la sua magnetizzazione; il contrario succede per l'acciaio, a cagione della sua forza coercitiva che è molto maggiore di quella del ferro.

Riservandoci di descrivere più innanzi la calmitazione col mezzo delle correnti, riferiamo ora gli

altri processi di calamitazione in uso da tanto tempo, i quali consistono nel sottoporre una sbarra che si vuole calamitare all'azione di un campo variabile, strofinandovi sopra delle calamite.

Col metodo detto del *semplice contatto* si fa scorrere l'estremità di una forte calamita lungo la sbarra di acciaio da calamitare dall'uno all'altro capo, sempre nello stesso verso, e ripetendo più volte l'operazione: all'estremità che si abbandona da ultimo, si desterà per induzione un polo di nome contrario all'inducente.

Col *contatto separato*, sulla sbarra da magnetizzarsi, e nel mezzo di essa, si appoggiano i poli di

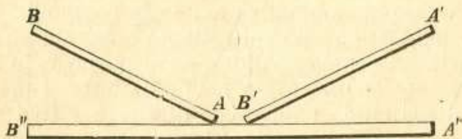


Fig. 428.

nome contrario *A B'* di due forti calamite (fig. 428); indi si fanno strisciare questi due poli uno da una parte e l'altro dall'altra verso le estremità della sbarra, in ciascuna delle quali si desterà un polo di nome contrario all'inducente. Si facilita l'operazione appoggiando le estremità della sbarra sui poli di due altre calamite fisse, in modo che la loro induzione aiuti quella dei due poli mobili.

Col *doppio contatto* si adagia la sbarra sulle estremità opposte delle due calamite fisse, come dianzi, e si fanno scorrere su e giù i poli contrari di due calamite, tenuti separati da un pezzetto di legno.

L'esperienza prova che la calamitazione, a meno che non si tratti di campi molto intensi, penetra

soltanto a poca profondità entro la sbarra: si può verificare questa cosa immergendo una calamita in un acido che ne corroda lo strato superficiale; si trova allora che essa ha perduto quasi tutto il magnetismo.

Perciò, invece di adoperare sbarre molto spesse, val meglio comporre la calamita con tante lamine o molle di acciaio magnetizzate separatamente, e poi sovrapposte in guisa da formare un fascio, con i poli dello stesso nome tutti dalla medesima parte. La fig. 429 mostra una siffatta calamita a ferro di cavallo, detta calamita di Jamin; le molle calamitate *L L'* hanno gli estremi impegnati in due astucci di ferro dolce, tenuti insieme da un pezzo di rame *D* interposto.

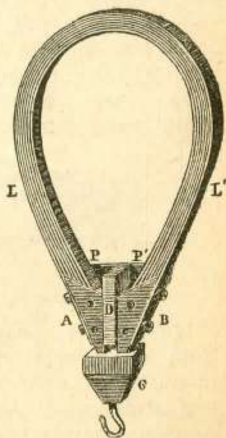


Fig. 429.

376. **Conservazione delle calamite; armature.** — Per conservare le calamite, bisogna aver cura di ripararle dagli urti e da forti riscaldamenti; e quando non si adoperano, conviene sottrarle all'azione del magnetismo libero delle estremità polari che tende a disorientare i magneti elementari. Quest'azione è nulla in una calamita foggiata ad anello, che può riguardarsi come un fascio di solenoidi chiusi su sè stessi, e per conseguenza senza azione alcuna nè all'interno nè all'esterno. Nella pratica si procura di realizzare tale condizione di cose, sia formando con le calamite dei circuiti chiusi, sia disponendole a due a due parallelamente coi

poli di nome contrario affacciati, e riunendo i poli per mezzo di due pezzi di ferro dolce, detti *armature* o *ancore* (fig. 430); queste, acquistando per induzione polarità contrarie ai poli inducenti, chiudono il circuito magnetico.

Anche nelle calamite a ferro di cavallo, se si riuniscono i due poli con un'ancora, se ne mantiene più a lungo l'intensità. La forma a ferro di cavallo è comoda, quando si tratta di far portare ad una calamita un peso. La *portata* d'una calamita si misura appunto col peso necessario a distaccare l'ancora; essa dipende evidentemante dall'intensità della magnetizzazione.

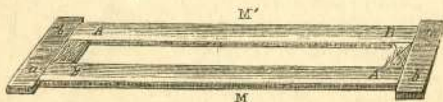


Fig. 430.

L'esperienza prova che per conservare una calamita giova farle portare un peso permanente; anzi la portata di una calamita si accresce, aumentando gradatamente il peso che deve reggere, ma sino ad un certo limite. Quando l'ancora si stacca a cagione di un eccesso del carico, la portata della calamita scende talvolta al disotto del valore primitivo; ma si può di nuovo *abituarla* a grado a grado a portare pesi sempre maggiori.

377. **Intensità della magnetizzazione; suscettività magnetica; isteresi.** — L'induzione magnetica si manifesta in diverso grado nelle varie qualità di ferro, e non nel ferro soltanto, poichè tutte le sostanze, quale più quale meno, vi vanno soggette; la ghisa, l'acciaio, il nichel, il cobalto sono, oltre il ferro, i quattro corpi che più risen-

tono l'induzione magnetica. In ogni caso *l'intensità della magnetizzazione* assunta da un corpo magnetico in un dato campo, varia a seconda della purezza dello stato di crudezza e della temperatura. Essa poi cresce colla intensità della forza magnetizzante, ma con una legge alquanto complessa, e non può oltrepassare un certo limite corrispondente alla *saturazione magnetica.* Se si considera una particella del pezzo di ferro soggetto all' induzione, ricordiamo che essa diventa una piccola calamita, con l'asse di lunghezza l rivolto nel senso della forza magnetizzante $\mathfrak{H}$ in quel punto, e con i poli d'intensità $+m$ e $-m$; per modo che il suo momento magnetico è $\mathfrak{M} = m\,l$. Or bene, detto v il volume della particella, l'intensità della magnetizzazione $\mathfrak{J}$ in quel punto è data dal rapporto $\frac{\mathfrak{M}}{v}$.
Dividendo poi l' intensità della magnetizzazione per la forza magnetizzante, si ottiene il cosidetto *coefficiente di magnetizzazione:*

$$k = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}},$$

il quale indica il grado in cui si magnetizzano per induzione i corpi; esso è detto anche *suscettività magnetica.*

La forza magnetizzante $\mathfrak{H}$ che bisogna considerare, è quella che si avrebbe qualora non vi fosse che aria, e risulta dal campo e dal magnetismo libero delle estremità polari, il quale tende a diminuire la magnetizzazione.

La fig. 431 fa vedere l'andamento del fenomeno per un filo lungo e sottile, ricotto immediatamente prima di cimentarlo: con un filo lungo e sottile si possono trascurare le azioni dovute alle quantità di

magnetismo libere ai poli, che complicano il fenomeno; in tal caso la forza magnetizzante ha lo stesso valore del campo. Le ascisse sono le forze magnetizzanti $\mathcal{H}$, e le ordinate corrispondenti l'intensità di magnetizzazione nel sistema assoluto (*CGS*). La forza magnetizzante $\mathcal{H}$ aumenta gradatamente da *zero* sino ai valori più intensi: a ciò si riesce nella pratica, ponendo la sbarra in un rocchetto molto lungo, percorso da una corrente che si fa crescere mano a mano. L'intensità del campo

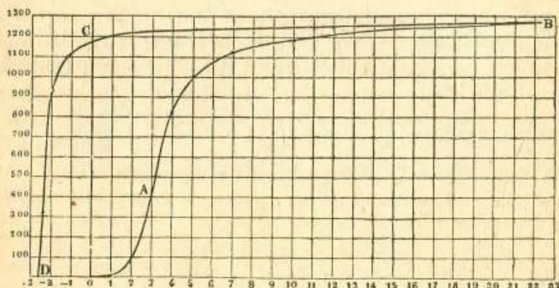


Fig. 431.

nell'interno del rocchetto è proporzionale all'intensità della corrente; e se la sbarra è molto lunga rispetto alla sezione, si può trascurare l'azione de' poli, e la forza magnetizzante ha lo stesso valore del campo, come si è detto innanzi.

La intensità della magnetizzazione aumenta in principio lentamente, poi rapidamente; e in seguito, in corrispondenza ai campi più intensi, la curva tende a divenire parallela all'asse orizzontale, mostrando che per quanto si accresce il campo, la magnetizzazione si accosta a un valore massimo

che corrisponde alla saturazione magnetica. La stessa curva mostra che la suscettività del ferro è da principio molto piccola, poi cresce rapidamente in corrispondenza ad una forza magnetizzante da 2 a 3 unità, in seguito diminuisce. Nel ferro incrudito, nell'acciaio, il fenomeno è in sostanza lo stesso, ma i numeri sono diversi.

Esaminando il caso del ferro, la figura mostra che facendo in seguito diminuire il campo sino a *zero*, la curva discendente della magnetizzazione descrive il tratto BC; quando poi il campo s'inverte da *zero* in D, la curva discende secondo CD, prima lentamente e poi rapidamente. Vediamo di interpretare questo andamento di cose. Prima di tutto è a notare l'esiguo dileguarsi del magnetismo al diminuire della forza magnetizzante; difatti quando questa si è ridotta a zero, la *magnetizzazione residua* è ancora ben grande; ma essa persiste debolmente, perchè basta una forza contraria debole come OD per dissiparla. Tale forza si può prendere come misura della stabilità della magnetizzazione residua, ossia della *forza coercitiva:* essa è debole nel ferro dolce, maggiore nel ferro incrudito, grandissima nell'acciaio. Si vede dunque, come si è detto, che il magnetismo indotto in parte è *temporaneo*, sparisce cioè col cessare della forza magnetizzante, in parte è *permanente*, ossia persiste. Ma persiste in modo debole nel ferro dolce, e perciò con le sbarre di questo metallo non si fanno che delle calamite temporanee (elettrocalamite); persiste di più nel ferro ordinario, in ispecie se incrudito.

L'acciaio poi temperato, non solo conserva la massima parte del magnetismo indotto, ma la conserva stabilmente a cagione della sua grande forza coercitiva.

Si è notato che il magnetismo libero che si manifesta ai poli, tende a produrre una polarizzazione di senso contrario, e quindi a diminuire il magnetismo residuo; tale *forza smagnetizzante*, mentre produce effetti cospicui nelle sbarre corte e grosse, riesce quasi insensibile nelle lunghe e sottili, ed è nulla in un anello chiuso; e però, mentre la magnetizzazione permanente del ferro dolce è presso che nulla in un cilindro grosso e breve, è ragguardevole in un anello chiuso di ferro. Inoltre la stessa fig. 431 dimostra che la curva della magnetizzazione decrescente fra due valori della forza magnetizzante è diversa da quella della magnetizzazione crescente fra i due medesimi valori; di guisa che ad uno stesso valore della forza magnetizzante corrispondono due diversi valori della magnetizzazione: questa dunque dipende non solo dalle condizioni attuali, ma anche dagli stati anteriori, e l'intensità della fase discendente supera quella della fase ascendente.

Si vede che la magnetizzazione segue le variazioni della forza magnetizzante con un certo ritardo; tale tendenza di tutti i corpi magnetici a perseverare nello stato in cui si trovano, fu chiamata dall'Ewing *isteresi magnetica*.

A cagione dell'isteresi non ha un significato preciso la suscettività definita del rapporto $\frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$, poichè ad uno stesso valore di $\mathfrak{H}$ possono corrispondere due valori diversi di $\mathfrak{J}$; bisogna quindi, per eliminare ogni dubbio, intendere che si tratti di un pezzo di ferro, il quale venga assoggettato la prima volta all'azione di una forza magnetizzante, crescente di continuo a partire da zero.

378. **Flusso d'induzione; permeabilità magnetica.** — La magnetizzazione del corpo produce inol-

tre una perturbazione nella distribuzione delle linee di forza, per cui esse in vicinanza del corpo cessano di essere parallele ed equidistanti; si constata infatti un'affluenza di linee che appaiono convergere a un capo, mentre dalla parte opposta esce un fascio che ne rappresenta come la continuazione (fig. 432). Così il campo viene ad essere rinforzato di fronte ai capi del pezzo di ferro, verso cui convergono e donde divergono le linee di forza, mentre poi lo stesso campo risulta indebolito nelle regioni

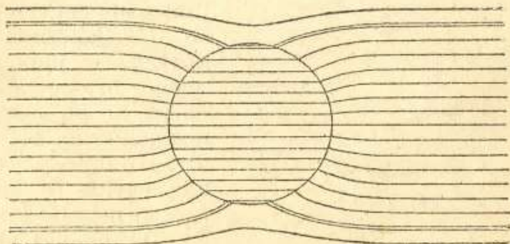


Fig. 432.

di fianco da cui le linee vengono distratte: sembra insomma che il ferro, e in generale le sostanze fortemente magnetiche, agevolino in certo modo il corso delle linee di forza offrendo a queste una via più facile attraverso alla loro massa. Nello stesso tempo il corpo è attraversato da linee di forza dovute alla sua calamitazione, dette *linee di magnetizzazione*, le quali si compongono colle linee di forza del campo. Il flusso complessivo $\mathfrak{B}$ che attraversa l'unità di area del magnete normalmente alla calamitazione, è detto *flusso d' induzione o induzione magnetica.*

Il rapporto μ tra il flusso di induzione magnetica $\mathfrak{B}$ e la forza magnetizzante $\mathfrak{H}$:

$$(1) \qquad \mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$$

è detto *permeabilità magnetica.*

Il coefficiente di permeabilità dipende dalla natura del corpo, dalla sua crudezza, dalla temperatura, e per quelli assai magnetici anche dall'intensità del campo.

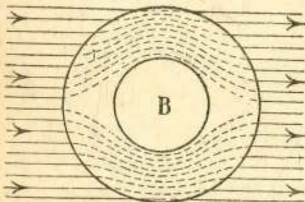


Fig. 433.

379. **Schermi magnetici.** — Immaginiamo ora d'introdurre in un campo magnetico un blocco di ferro dolce avente una cavità B (figura 433) nel suo interno. Da quanto si è detto innanzi si deduce che le linee di forza penetrate nella massa del ferro, percorreranno nella massima parte lo spessore di questo che è molto permeabile, piuttosto che penetrare dentro la cavità che al flusso di forza magnetica oppone una resistenza molto maggiore.

Ne segue che un corpo posto nella cavità B non risentirà punto l'azione del campo magnetico esterno; perciò, se si vuole difendere un corpo dall'influenza magnetica di altri corpi, bisogna involgerlo con uno spesso involucro di ferro dolce: tale involucro costituisce uno *schermo magnetico.*

CAPITOLO XIII.

Elettromagnetismo.

380. **Esperienza di Oersted; regola di Ampère.** — Se si avvicina ad un ago di declinazione un filo percorso da una corrente, l'ago devia subito dalla sua posizione di equilibrio: si dice che questo fatto venne osservato, sino dal 1802, dal Romagnosi, il quale però non pubblicò la scoperta. Più tardi, nel 1819, Oersted di Copenaghen non solo fece la medesima osservazione, ma determinò esattamente il senso della deviazione per ogni posizione relativa della corrente e dell'ago, e scoprì che questo tende in ogni caso a disporsi normalmente alla direzione della corrente.

L'esperimento di Oersted si può ripetere con facilità, tendendo nel meridiano magnetico un filo di rame collegato ad un polo della pila; finchè il circuito rimane aperto, l'ago non devia; ma non si tosto si chiude il circuito, la deviazione succede e dura finchè passa la corrente. Il senso della deviazione è dato in ciascun caso da questa semplicissima regola dovuta ad Ampère: *il polo nord dell'ago devia sempre alla sinistra della corrente personificata,* intendendosi per sinistra della corrente personificata la sinistra di un osservatore adagiato lungo il filo con la faccia rivolta all'ago, in modo

che la corrente entri per i suoi piedi ed esca per la sua testa (fig. 434). Se il filo è teso sopra all'ago in direzione perpendicolare al meridiano magnetico, e la corrente è diretta da ponente a levante, l'ago conserva la sua posizione naturale. Da questa esperienza e dalla precedente si deduce, che *l'azione*

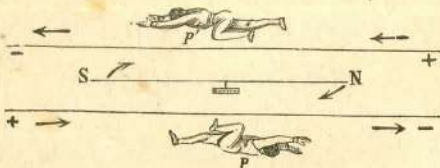


Fig. 434.

magnetica esercitata dalla corrente su ciascuno dei poli dell'ago, è ad angolo retto con la direzione della corrente stessa, concordemente all'osservazione suddetta di Oersted.

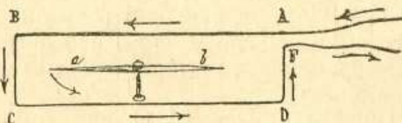


Fig. 435.

Se il reoforo si piega in modo da circondare l'ago, come è indicato dalla fig. 435, è facile vedere, applicando la regola di Ampère, che le diverse parti del reoforo, avendo tutte la loro sinistra dalla stessa parte, cospirano a farlo deviare nel medesimo senso, e l'esperienza conferma la cosa; la deviazione in tal caso è poi maggiore che con un ramo solo.

381. **Galvanometri.** — Avvolgiamo ora parecchie volte su un telaio un reoforo isolato con la

seta affinchè i vari giri non comunichino lateralmente fra loro; si ha così il *telaio moltiplicatore* di Schweiger: se si dispone il piano del telaio nel meridiano magnetico, e si sospende nel suo mezzo un ago di declinazione (fig. 436), questo devierà per una corrente anche debole, e si verificherà l'equilibrio quando il momento della coppia deviatrice dovuta alla corrente sarà eguale al momento della coppia dovuta all'azione terrestre, che tende a ricondurre l'ago nel meridiano magnetico.

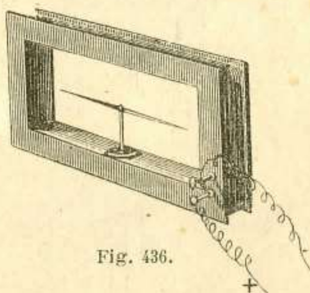


Fig. 436.

Aggiungiamo un circolo diviso in gradi per misurare la deviazione, ed avremo un *galvanometro*, il quale servirà non solo a constatare l'esistenza e la direzione di una corrente, ma a misurarne anche l'intensità.

Di galvanometri ve ne sono di forme diverse, e tutti servono a misurare l'intensità di una corrente per mezzo del suo effetto elettromagnetico, eccetto quelli a filo caldo per la misura di correnti alternate.

L'esperienza mostra che la deviazione è indipendente dal grado di calamitazione dell'ago; il che prova che l'azione della corrente, come quella del

campo terrestre, sono proporzionali all'intensità del polo considerato. La deviazione aumenta d'altronde, come è naturale, con l'intensità della corrente, e quindi può servire a misurarla. Tale è il principio della misura *elettromagnetica* delle correnti.

La fig. 437 mostra il galvanometro del Nobili, nel quale ad un filo di seta, invece di un solo ago, è

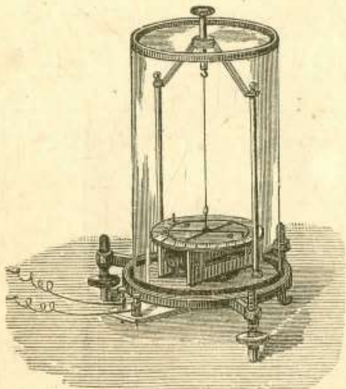


Fig. 437.

sospeso un *sistema astatico,* un sistema cioè di due aghi con i poli di nome contrario di fronte. Con ciò diminuisce l'azione direttrice della terra, e il galvanometro è più sensibile; vale a dire, ad una intensità di corrente anche minima, corrisponde una grande deviazione. Uno solo degli aghi è avvolto dalle spire del telaio, l'altro si trova fuori (fig. 438); ma se si applica la regola suddetta di Ampère, si vede che l'azione magnetica de' diversi

tratti cospira in definitiva a far deviare il sistema degli aghi dalla stessa parte, e così l'effetto è più intenso.

Un galvanometro molto usato oggi è quello del d'Arsonval. Un quadro rettangolare, mobile intorno ad un asse formato da due fili metallici che vi portano la corrente (fig. 439), è collocato nel campo molto intenso compreso fra le branche di un fascio di calamite a ferro di cavallo e un cilindro vuoto di ferro dolce. Questo è mantenuto nel mezzo del quadro, senza toccarlo, da un supporto indipendente, e serve a concentrare il flusso di forza nello spazio occupato dal quadro mobile. Quando la corrente passa, il piano del quadro tende a disporsi normalmente al flusso magnetico, ma la forza elastica di torsione de' fili fa equilibrio all'azione elettromagnetica. La deviazione è letta col mezzo di uno specchietto unito al quadro mobile, che riflette un raggio luminoso su una scala divisa in parti eguali. L'intensità della corrente è sensibilmente proporzionale alla deviazione: e però basta, una volta per tutte, determinare la *costante galvanome-*

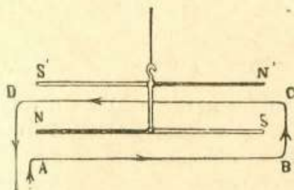
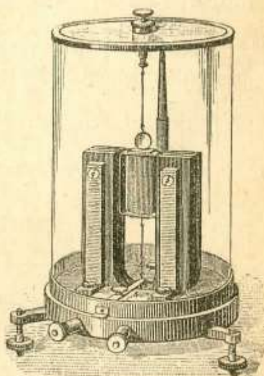


Fig. 438.


Fig. 439.

trica, ossia la deviazione corrispondente a un *microampère* (milionesimo di ampère), per dedurne l'intensità che corrisponde a una deviazione qualunque. S'intende allora che nulla deve mutare nell'istrumento, e che la scala deve essere posta a una distanza fissa.

Questo galvanometro si colloca su una mensola, in un'orientazione qualunque: pezzi di ferro o calamite vicine non lo influenzano; bisognerebbe invece tenerli lontani dagli altri galvanometri dove l'ago è mobile.

382. **Correnti derivate.** — Un galvanometro costruito per misurare correnti molto piccole, come

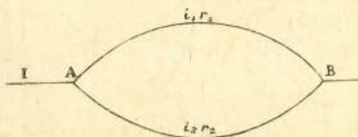


Fig. 440.

i due ora descritti, può anche servire alla misura di quelle intense, ponendo tra i suoi serrafili una derivazione *(shunt)*, per la quale passa la maggior parte della corrente da misurarsi.

Noi ci limiteremo a studiare soltanto il caso che tra due punti A e B il circuito si divida in due rami di derivazione, i quali abbiano rispettivamente le resistenze r_1 ed r_2 e siano percorsi da *correnti derivate* i_1, i_2 (fig. 440). Sia I la corrente principale, ossia l'intensità della corrente innanzi al punto A, o dopo il punto B; si ha evidentemente:

$$(1) \qquad I = i_1 + i_2 .$$

Se ora diciamo R la resistenza equivalente ai due rami di derivazione, vale a dire la resistenza unica

che darebbe la medesima caduta del potenziale fra A e B, si hanno per la legge di Ohm le equazioni seguenti:

$$(2) \qquad i_1 r_1 = i_2 r_2 = I R;$$

dalle quali si ricava:

$$(3) \quad i_1 = I . \frac{r_2}{r_1 + r_2}; \; i_2 = I . \frac{r_1}{r_1 + r_2}; \; \frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}.$$

La terza può scriversi:

$$(4) \qquad R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Dicendo *conduttività* di un filo l'inversa della sua resistenza, l'ultima delle (3) esprime che *la con-*

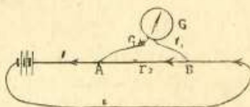


Fig. 441.

duttività complessiva di due circuiti derivati, e in generale di un numero qualunque, è eguale alla somma delle conduttività di ciascuno dei rami derivati. Si ha poi dalla prima che:

$$(5) \qquad I = i_1 \frac{r_1 + r_2}{r_2}.$$

A questa relazione si ricorre spessissimo nella galvanometria, quando occorra misurare correnti troppo intense per un dato galvanometro; allora si mette, come si è sopra accennato, il galvanometro in derivazione fra i punti A, B (fig. 441): tale derivazione o *shunt* permette di non far passare nel gal-

vanometro che una frazione conosciuta della corrente, la quale sarà tanto più debole quanto minore è la resistenza del ramo esterno all'istrumento. Dicendo s la resistenza dello shunt, g quella del galvanometro, la (5) può scriversi:

$$I = \frac{s+g}{s} i_1 .$$

Misurata l'intensità i_1 della corrente derivata, e determinato una volta per tutto il valore del fattore $\frac{s+g}{s}$, la formula dà subito la intensità I della corrente principale. Questo fattore è detto *potere moltiplicatore* dello shunt; indicandolo con m, si ha dunque:

$$I = m . i_1 .$$

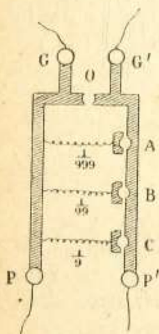


Fig. 442.

I galvanometri sono ordinariamente muniti di tre shunt, aventi rispettivamente per poteri moltiplicatori 10, 100, 1000, le cui resistenze sono per conseguenza $^1/_9$, $^1/_{99}$, $^1/_{999}$ di quella del galvanometro.

I due capi del filo del galvanometro sono uniti ai torchietti G, G', mentre i serrafili P, P' servono a inserire l'istrumento nel circuito; si vede (fig. 442) che basta chiudere con una caviglia metallica uno dei fori A, B, C per introdurre la derivazione corrispondente. Quando si mette la caviglia in 0, il galvanometro è chiuso su sè stesso; questa è la posizione di sicurezza.

383. **Impiego del voltametro per la taratura dei galvanometri.** — Ma si può anche graduare il galvanometro munito di uno shunt, senza conoscere

nè la resistenza dell'istrumento nè quella dello shunt, giacchè si determina la costante misurando l'intensità della corrente principale per mezzo di un voltametro; quello a nitrato di argento è il più preciso, quando è impiegato colle seguenti precauzioni.

Per catodo si prende una capsula di platino di 10 cm. almeno di diametro e di 4 o 5 cm. di profondità. L'anodo è una piastra di argento puro, della superficie di 30 cm.^{2}, e dello spessore di 2 a 3 mm. per una corrente di un ampère circa; essa è sospesa orizzontalmente nell'elettrolito per mezzo di un filo di platino passante in alcuni fori fatti nella piastra. Per prevenire la caduta sul catodo dell'argento disaggregato all'anodo, questo è circondato da carta di filtro mantenutavi con ceralacca. Il liquido deve essere una soluzione neutra di nitrato d'argento, contenente in peso 15 di nitrato per 85 di acqua.

La resistenza del voltametro varia mentre dura il passaggio della corrente: per evitare che i suoi cambiamenti esercitino un effetto troppo sensibile sulla corrente, è utile d'inserire nel circuito una resistenza addizionale, di modo che la resistenza totale non sia inferiore a 30 ohm.

Per preparare l'esperienza, si lava dapprima la capsula di platino con acido nitrico, poi con acqua distillata; la si asciuga in una stufa, e si lascia raffreddare prima di pesarla. La capsula si riempie allora della soluzione di nitrato e la si pone sopra un sostegno di rame isolato munito d'un serrafilo; immerso l'anodo nel liquido, si chiude il circuito per mezzo di una chiave, e si nota l'ora; si mantiene la corrente almeno 20 minuti. Si ritira allora la soluzione e si lava la capsula con acqua distillata e con alcool; si secca il recipiente in una stufa ad aria, e si pesa di nuovo. La differenza di peso

in grammi rappresenta l'argento deposto: dividendo per il numero dei secondi durante i quali la corrente è passata, e per 0,001118 che è l'equivalente elettrochimico dell'argento, si ha l'intensità media in ampère, che sarebbe anche l'intensità vera se la corrente non avesse variato.

Perciò questa dev'essere mantenuta il più possibilmente costante per mezzo della resistenza addizionale che si è detta, e la lettura del galvanometro deve essere fatta ad intervalli di tempo vicini. Le osservazioni poi forniscono, in ogni caso, gli elementi di una curva che permette di determinare la *deviazione corrispondente ad una data intensità di corrente,* e quindi la costante dell'istrumento.

Per graduare i galvanometri industriali, si preferisce il voltametro con solfato di rame a quello con nitrato d'argento, perchè le sostanze impiegate costano meno, e il loro uso è più comodo.

384. **Amperometri.** — Nelle industrie i galvanometri da noi descritti non si presterebbero a misurare speditamente le correnti di grande intensità: si sono perciò immaginati dei galvanometri speciali di piccola resistenza, di facile maneggio, meno sensibili però; essi vengono inseriti nel circuito, e sono percorsi quali dalla totalità della corrente e quali altri da una frazione; sono poi graduati in modo che si legga immediatamente sulla loro scala la intensità della corrente principale in *ampère.* A questi galvanometri si dà il nome di *amperometri,* e ve ne sono di tante specie: esatti, pronti e d'uso molto facile sono quelli della Compagnia Weston di Newark nella New-Jersey. Essi, in ultima analisi, sono galvanometri del tipo d'Arsonval, con il quadro mobile che si appoggia su cappelletti d'agata, e due molle spirali in bronzo fosforoso fanno equilibrio alla forza deviatrice della corrente. Un in-

dice affilato di alluminio fissato al quadro mobile indica sul quadrante graduato l'intensità della corrente in ampère (fig. 443).

In generale l'istrumento funziona come milliamperometro: può disporsi in qualunque posizione, ed è sempre pronto a servire, l'ago fermandosi di fronte allo zero della graduazione quando non vi passa corrente. In grazia poi dell'impiego di pezzi

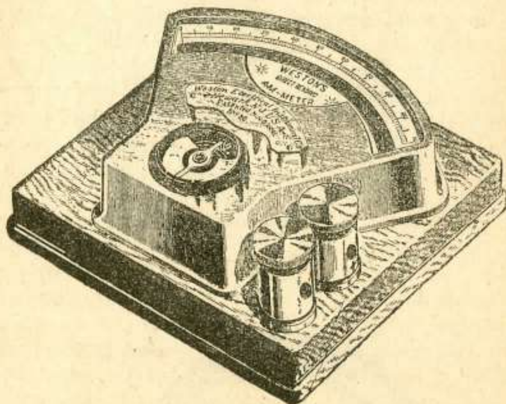


Fig. 443.

polari estesi, le deviazioni sono sensibilmente proporzionali alle correnti in un angolo di circa 70°. Per la misura di correnti forti, l'istrumento è dotato di uno shunt, il quale per lo più consiste in una lastrina di manganina strettamente unita ai due serrafili dell'istrumento.

Un altro amperometro è quello Carpentier rappresentato dalla fig. 444; fra i poli di due potenti calamite NS piegate a C, si trova un rocchetto RR

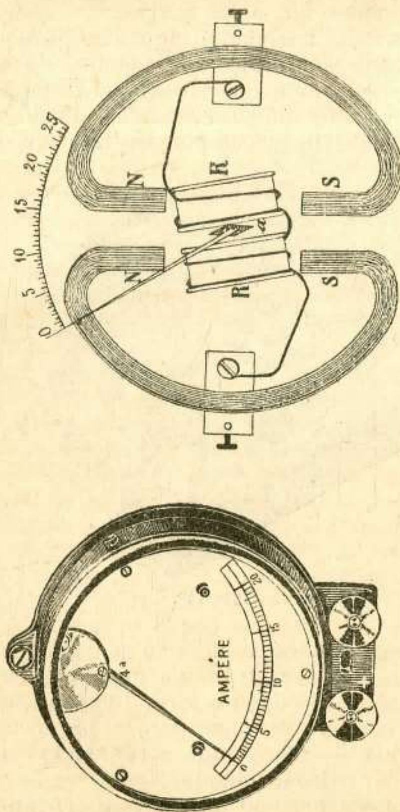


Fig. 444.

di poche spire, disposto obliquamente sulla linea de' detti poli. Entro a questo è imperniato un corto ago di ferro dolce *a*, a cui è unito un indice mobile dinanzi ad una graduazione. Quando la corrente percorre il rocchetto, l'ago, che i magneti tendono a mantenere parallelamente alla linea *N S*, viene invece dalla corrente sollecitato a disporsi secondo l'asse del rocchetto *R R*. Esso quindi prenderà una posizione tale per cui le due azioni si compensano, e per ogni valore dell'intensità di corrente si ha una determinata posizione. Il rocchetto non è normale alla linea de' poli ma un po' inclinato, per fare che le deviazioni riescano prossimamente proporzionali all'intensità della corrente.

Con gl'istrumenti ora detti non si deve far altro che riunire i capi del circuito ai morsetti appositi, e leggere sul quadrante l'intensità. Le oscillazioni sono fortemente smorzate, talchè l'indice si ferma subito, e ritorna anche prontamente allo zero appena aperto il circuito.

L'unica precauzione da usare con questi apparecchi è di non sottoporli a correnti troppo forti, al disopra di quelle che possono misurare, nè a correnti che tendano a far deviare l'ago in senso contrario.

Quando non si conosce a priori se l'intensità della corrente è compresa entro i limiti di quelle che si possono misurare con l'istrumento, bisogna inserire nel circuito delle resistenze regolabili, che si diminuiranno poi gradatamente, regolandosi colla deviazione dell'indice.

Si comprende inoltre che, potendo disporre di un amperometro ben graduato, esso servirà col confronto alla graduazione di altri simili strumenti, disponendoli in serie su uno stesso circuito semplice nel quale si fa variare per gradi la corrente.

385. **Voltometri.** — Ai due punti di cui si cerca la differenza di potenziale V (poli di una pila, di una dinamo, o due punti qualunque di un conduttore percorso da una corrente) si uniscono i termini di un galvanometro, al quale si aggiunge una resistenza molto grande: così la corrente che passa nell'apparecchio non modifica in modo apprezzabile la differenza di potenziale cercata.

Supponiamo che si ottenga nell'istrumento una deviazione α; sarà:

$$i = \frac{V}{r} = \frac{\alpha}{k}$$

dove r è la resistenza del galvanometro, sommata con quella aggiunta in serie con esso.

Operando allo stesso modo con un elemento campione la cui forza elettromotrice è e, si ha:

$$i' = \frac{e}{r} = \frac{\alpha'}{k},$$

da cui:

$$V = e\,\frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Bisogna far si che la corrente non modifichi la forza elettromotrice della pila campione: così, se si adopera l'elemento Latimer Clark (§ 346), si deve mettere in circuito una resistenza oltre i 10000 ohm.

Nel caso di un galvanometro le cui deviazioni sono proporzionali alle correnti, si può regolare la resistenza addizionale in modo che una deviazione rappresenti 1 volta o un multiplo esatto di volta. Si realizza in tal modo un *voltometro* che, *messo in derivazione* tra due punti, permette di determinare la loro dfferenza di potenziale con una sem-

plice lettura. Ma impiegando un tale strumento, bisogna sempre ricordare che la sua resistenza deve essere molto grande, affinchè la corrente che lo attraversa non modifichi là differenza di potenziale da misurare. E bisogna inoltre vegliare a che la sua resistenza non varii; onde sarà bene d'impiegare per l'avvolgimento di questi strumenti, come pure per gli shunt e le resistenze in serie, delle leghe di argentana ó di manganina che sono meno soggette a variare di resistenza colla temperatura.

Di più è bene che la corrente non passi nel voltometro continuamente ma solo il tempo necessario a fare la misura.

Si possono estendere i limiti d'impiego d'un voltometro aggiungendovi delle resistenze in serie, in modo da modificare la resistenza totale del circuito dell'apparecchio.

Se ad un valore r di questa corrisponde, per esempio, una divisione per *volta*, una resistenza $10\ r$ ottenuta aggiungendo $9\ r$ in serie, porta il valore di una divisione a 10 *volta*.

Il *voltometro Weston* è un galvanometro d'Arsonval, simile all'amperometro di cui si è parlato; è graduato direttamente in *volta* con uno de' metodi ora detto o col confronto di un altro strumento campione diligentemente tarato.

386. **Correnti mobili di Ampère.** — Se nell'esperienza d'Oersted si rende la calamita fissa e il conduttore mobile, questo, per la legge delle azioni e reazioni eguali e contrarie, si sposterà in modo da lasciare alla sua sinistra il polo nord della calamita, come si verifica appunto nel galvanometro del d'Arsonval che abbiamo detto; ma si può anche fare l'esperienza con l'apparecchio delle *correnti mobili* di Ampère.

La corrente arriva a due capsulette *a, b* piene di mercurio, poste sulla medesima verticale (fig. 445). Un filo conduttore convenientemente ripiegato forma un rettangolo *d e f g*, le cui estremità terminate da punte d'acciaio si immergono nel mercurio della capsuletta corrispondente e serve da pernio; l'altra non fa che pescare nel mercurio; così il rettangolo mobile è libero di girare intorno ad un asse verticale. Se allora si fa passare la corrente

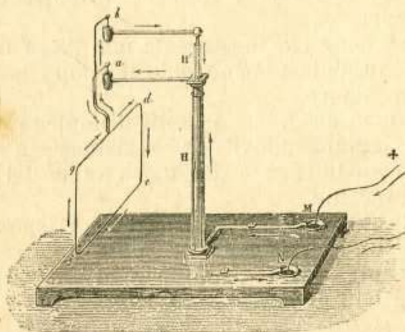


Fig. 445.

e si avvicina una calamita, la corrente mobile tende a mettersi in croce con il magnete, lasciando il polo nord alla sua sinistra. L'effetto è lo stesso qualunque sia la forma del circuito.

387. **Campo di una corrente. Azioni reciproche fra correnti e calamite.** — La conseguenza importante che deriva dall'esperienze di Oersted e di Ampère è che la corrente elettrica crea attorno a sè un campo magnetico; e che il campo di una corrente e quello d'una calamita, come pure quelli di due correnti, possono reagire l'uno sull'altro,

dando luogo ad azioni meccaniche a distanza, analoghe a quelle che si producono fra le calamite.

Ampère ha dimostrato che il campo di una corrente è un campo magnetico della stessa natura di quello prodotto da una calamita, godente le stesse e identiche proprietà; onde, se il campo è dovuto ad una modificazione dello spazio, essa dev'essere della medesima specie nei due casi.

Vediamo anzitutto che il campo di una corrente possiede la proprietà essenziale di un campo magnetico: a tal fine esploriamolo con il solito metodo dello spettro magnetico, e constateremo

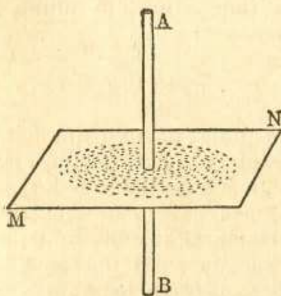


Fig. 446.

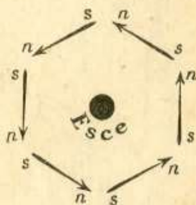


Fig. 447.

che nel caso di una corrente rettilinea abbastanza intensa, i minuzzoli di ferro si disporranno in tanti circoli sopra un cartoncino orizzontale perpendicolare alla corrente (fig. 446). Le linee di forza del campo sono dunque circonferenze concentriche, aventi il loro centro sul filo, e le superficie di livello sono piani equidistanti passanti per l'asse.

Pertanto la forza magnetica in un dato punto del campo dovuto alla corrente, è perpendicolare al piano che passa per quel punto e per la corrente, ed è diretta verso la sinistra della corrente perso-

nificata; talchè la polarità indotta nelle particelle del ferro sarà quale è indicata dalla fig. 447, dove si suppone che nel reoforo la corrente sia diretta dal foglio verso il lettore.

Inoltre Biot e Savart hanno mostrato sperimentalmente che, *nel caso di un conduttore rettilineo indefinito, l'intensità della forza magnetica dovuta alla corrente in un punto, è in ragione diretta dell'intensità della corrente e del polo, e in ragione inversa della distanza.*

La forza φ esercitata sopra un polo positivo m da una corrente rettilinea indefinita può dunque esprimersi:

$$\varphi = k\frac{i\,m}{r},$$

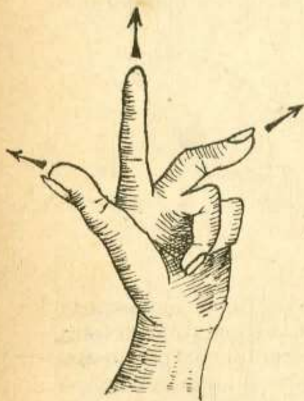


Fig. 448.

nella quale i è l'intensità della corrente, r la sua distanza dal polo, e k una costante. E poichè la reazione è uguale e contraria all'azione, un polo m esercita sulla corrente la medesima forza, la quale però è diretta *verso la destra* del fantoccio di Ampère che guarda il polo; o verso la sua sinistra se esso, in luogo di guardare il polo, guardasse invece nel senso delle linee di forza emergenti dal polo stesso.

388. **Regola di Fleming.** — Fleming ha indicato, sotto il nome di *regola delle tre dita*, un mezzo per aiutare la memoria a ricordare il senso della forza, e quindi dello spostamento d'una corrente supposta libera di muoversi in un campo magne-

tico. Se si dispongono le prime tre dita della *mano sinistra* secondo tre direzioni perpendicolari (fig. 448), l'indice nel senso delle linee di forza magnetica $\mathcal{H}$, il medio nel senso della corrente i, il pollice indica il verso secondo cui la corrente tende a spostarsi, ossia il senso della forza elettromagnetica f.

389. **Corrente circolare; sua azione su un polo posto nel suo centro.** — Se il filo che conduce la corrente ha forma diversa dalla rettilinea, le linee di forza cessano in generale di essere circolari, ma seguitano ad avvolgere il filo, come è indicato dalla fig. 449.

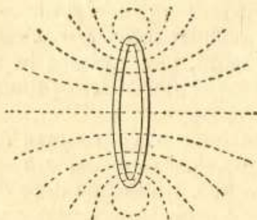


Fig. 449.

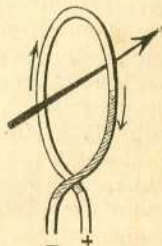


Fig. 450.

Ne viene di conseguenza che una corrente circolare che vada nel verso delle lancette di un orologio, produce un campo magnetico diretto come indica la freccia grande nella fig. 450; cosicchè siffatta corrente equivale ad una lamina magnetica che rivolgesse al lettore la sua faccia sud. E in prova di ciò, una corrente che percorre un reoforo rettangolare o circolare sospeso nell'apparecchio di Ampère (fig. 445), sotto la sola azione del campo terrestre si dispone perpendicolarmente al meridiano magnetico, come farebbe una lamina magnetica col polo nord su una faccia e il sud sull'altra,

sospesa verticalmente a un filo senza torsione. Nella posizione di equilibrio, la corrente è discendente nel ramo che si dispone all'est, ascendente nel ramo verso ovest; o in altre parole, un osservatore che guarda di fronte la faccia del circuito rivolta al nord, vede circolare la corrente in senso inverso agli indici di un orologio.

Per ricordare la direzione del campo magnetico dovuto ad una corrente, osserviamo la fig. 450 ove la freccia grande indica la direzione del campo prodotto dalla corrente, ossia il senso secondo cui sarebbe sollecitato a muoversi un polo nord. — Queste due direzioni sono legate dalla medesima relazione che il movimento di progressione e di rotazione di un cavaturaccioli: Maxwell anzi ha messo innanzi questo esempio, per aiutare la memoria a ricordare la direzione del campo magnetico dovuto ad una corrente.

Si dimostra poi che una corrente circolare d'intensità i, che faccia n giri, esercita su un polo magnetico m posto nel centro, un'azione data dalla relazione

$$F = k \cdot \frac{2\pi m n i}{r}$$

essendo r il raggio del circolo.

Si è scelta l'*unità elettromagnetica di corrente* in modo che nell'aria k sia eguale all'unità; cosicchè la precedente equazione si scrive più semplicemente

$$F = \frac{2\pi m n i}{r}.$$

Facendo in questa $m = 1$, $n = 1$, $i = 1$, $r = 1$, si ha $F = 2\pi$; ossia l'*unità assoluta di corrente* è quella che piegata in circolo con il raggio di 1 cm., eser-

cita su un polo *uno* posto nel suo centro, la forza di 2π dine.

L'unità industriale (ampère) che abbiamo detto, venne fissata in $^{1}/_{10}$ dell'unità assoluta.

390. **Equivalenza di una corrente chiusa e di una lamina magnetica. — Solenoidi elettromagnetici.** — Ampère che ha scoperto l'identità di effetti di una lamina magnetica e di una corrente, ne dà la seguente spiegazione.

L'esperienza mostra che una piccola corrente chiusa agisce come una piccola calamita normale al piano della corrente, con la condizione che il momento della calamita sia eguale all'intensità della corrente moltiplicata per la superficie del circuito. Ciò posto, supponiamo un circuito finito qualunque, diviso per mezzo di linee condotte nell'interno in una rete di un numero grandissimo di maglie, e ammettiamo che i contorni di ciascuna maglia siano percorsi da correnti eguali e dello stesso verso (fig. 451). Ne seguirà che le linee interne della rete saranno percorse da correnti eguali e contrarie, che si annulleranno a due a due; e il solo contorno esterno del circuito sarà percorso da una corrente efficace. Sostituendo ora a ciascuna maglia la calamita elementare equivalente, la riunione di tutte queste calamite elementari forma una lamina magnetica, il cui effetto è identico a quello della corrente che ha il medesimo contorno.

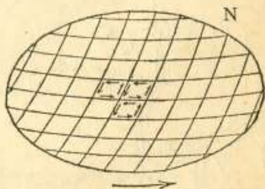


Fig. 451.

Ampère da queste considerazioni ha poi dedotto l'ipotesi che diremo più innanzi, secondo cui i fe-

nomeni magnetici consisterebbero in fenomeni elettrici.

Un *solenoide elettromagnetico* è formato da un sistema di correnti circolari della medesima superficie e della stessa intensità, distribuite a distanze eguali, lungo una linea qualunque detta direttrice. Tale è il solenoide della fig. 452, dove la direttrice è una linea retta. Ciascuna corrente potendo essere sostituita dalla lamina magnetica equivalente, il sistema equivale ad un magnete calamitato uniformemente. Si realizza con facilità un tale sistema di correnti, avvolgendo un filo in elica serrata sulla superficie di un cilindro. Ciascuno degli elementi della spira equivale ad una corrente circolare e ad una corrente rettilinea nel senso dell'asse: se la sezione del cilindro è piccola, si distrugge l'effetto di quest'ultima facendo ritornare il filo in senso contrario parallelamente all'asse. Sospeso nell'apparecchio di Ampère (fig. 453), esso si dirige esattamente col suo asse nel meridiano magnetico: l'estremo in cui la corrente circola come gli indici di un orologio è il polo sud, l'altro è il polo nord.

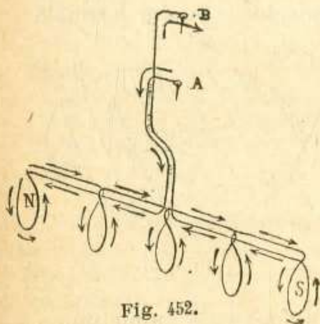


Fig. 452.

Insomma un sistema così fatto si comporta in tutto e per tutto come un magnete solenoidale: avvicinando all'estremo che si volge a settentrione il polo nord di una calamita, lo respinge; il polo sud invece lo attira. Se poi l'ago è mobile e si tien fisso il sole-

noide, le cose accadono allo stesso modo, perchè le azioni sono reciproche. Da tali esperienze si deduce che le sbarre magnetizzate si comportano del

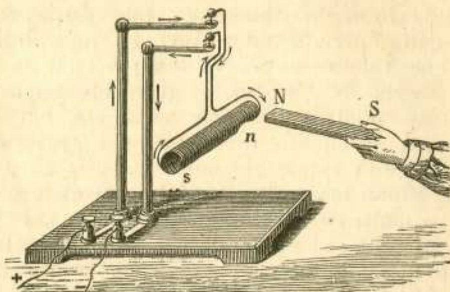


Fig. 453.

tutto come solenoidi elettrodinamici; la sola differenza è che questi hanno i poli esattamente all'estremità, e le calamite li hanno un po' all'interno.

Anzi Ampère ha supposto che le calamite siano una semplice riunione di correnti che circolano incessantemente intorno a ciascuna molecola. Quando il corpo non è magnetizzato, queste correnti elementari sono dirette in tutti i modi possibili, e però le azioni verso l'esterno si compensano; la magnetizzazione le conduce a circolare nel medesimo verso e in piani paralleli

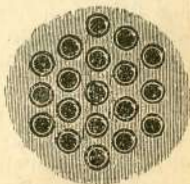


Fig. 454.

(fig. 454). Allora i tratti contigui sono percorsi da correnti eguali e di senso contrario le cui azioni si annullano, e non restano efficaci che le porzioni

che corrispondono agli elementi periferici, le quali si compongono in una corrente unica.

La calamita così considerata è dunque un solenoide; e se i suoi poli non sono esattamente alle estremità, ciò è da assegnarsi alle azioni scambievoli delle correnti elementari, le quali impediscono che tale orientazione sia perfetta. Secondo questa teoria di Ampère, si dovrebbe ritenere la terra stessa come un enorme solenoide, nel quale le correnti sarebbero dirette da est ad ovest, nel verso del moto apparente del sole.

391. **Elettrocalamite.** — Un pezzo di ferro o di acciaio o d'altro corpo magnetico, posto nel campo di una corrente, si magnetizza come se fosse nel campo di una calamita, dappoichè la corrente orienta le correnti d'Ampère che circolano intorno ai magneti elementari. Il fatto della calamitazione del ferro per la corrente è stato scoperto da Arago (an. 1820): egli osservò che un filo di rame percorso da una corrente, tuffato nella limatura di ferro, l'attirava su tutta la sua superficie; ciascuna particella di ferro diviene difatti una piccola calamita e si dispone perpendicolarmente al filo secondo la linea di forza, col polo nord a sinistra della corrente. Egualmente si calamita una sbarra quando la si mette in croce con la corrente; e l'azione di questa è maggiore se si avvolge il filo ad elica intorno alla sbarra perpendicolarmente al suo asse. Il senso della calamitazione è quello del campo nell'interno dell'elica, cioè il polo nord si desterà alla sinistra della corrente personificata: ovvero si può anche dire che esso è nell'estremità dell'elica dove la corrente è vista circolare nel senso inverso degli indici di un orologio (§ 390).

Se si cangia bruscamente il senso della corrente, si inverte anche la polarità. Invece che avvolgere

il filo ad elica sopra la sbarra, torna più comodo avvolgerlo sopra un tubo di vetro o di cartone (fig. 455); e il magnetismo della sbarra risulta distribuito in modo normale, se l'elica è avvolta uniformemente. Quando essa forma più strati, bisogna



Fig. 455.

che il conduttore sia isolato con della seta o del cotone; si ha allora un rocchetto (fig. 456), nel quale si introduce la sbarra *A B* che si vuole calamitare, prima ancora di chiudere la corrente. È questo il metodo di calamitazione, al quale si è accennato nel § 375.

Se la sbarra è di acciaio temprato, al cessare della corrente essa conserva stabilmente la maggior parte del magnetismo acquistato, in grazia della grande forza coercitiva; questo è il miglior modo per ottenere calamite permanenti. Quando invece la sbarra è di ferro dolce non troppo lunga, si smagnetizza quasi perfettamente col cessare della corrente: a questo modo si ha un'eccellente *calamita temporanea*, la quale diventa rapidamente attiva o inattiva collo stabilirsi o col cessare della corrente. Queste calamite temporanee sono dette *elettrocalamite* od anche *elettromagneti:* il nucleo di ferro dolce può essere rettilineo come nella figura 456, o in forma di ferro di cavallo come nella fig. 457. Nel secondo caso si sopprimono generalmente le

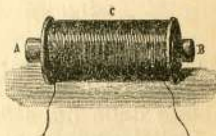


Fig. 456.

spire nella parte curva; l'avvolgimento sui due rami deve esser fatto in modo che si destino due poli di nome contrario alle due estremità, ossia deve essere lo stesso come se la sbarra fosse stata curvata dopo eseguito l'avvolgimento: in altre parole, bisogna che la corrente sia vista circolare in senso contrario da un osservatore che guardi le due estremità, girando come gli indici di un orologio intorno al polo sud, e in senso inverso al polo nord, come si è ripetuto più volte. L'elettrocalamita a ferro di cavallo è sovente formata

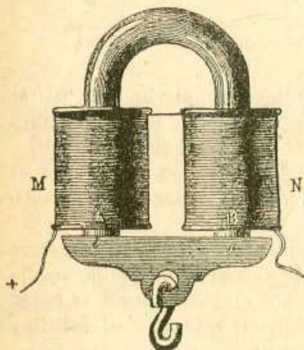


Fig. 457.

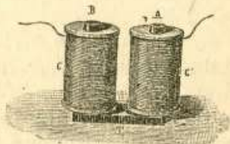


Fig. 458.

da due rocchetti paralleli, i cui nuclei sono rilegati in basso con una sbarra pure di ferro, come è indicato dalla fig. 458.

L'elettrocalamita a ferro di cavallo acquista una grande portata, ossia si richiede una gran forza per istaccare l'àncora in contatto immediato con le estremità polari: Joule ne costrusse una che reggeva il peso di una tonnellata.

La *portata* è diversa dalla *forza attrattiva*, che è la forza con la quale viene attratta l'àncora, quando è vicinissima ai poli, senza però venire a contatto con essi. Tanto la portata come la forza attrattiva

dipendono dalla massa del nucleo di ferro e dell'àncora, dalla loro forma, e, come è evidente, dalla intensità della magnetizzazione; questa è funzione, alla sua volta, della qualità del ferro e della intensità della corrente, ossia del campo.

392. **Campo nell'interno di un rocchetto.** — Il campo magnetico nell'interno di un rocchetto, se l'avvolgimento dell'elica è fatto uniformemente,

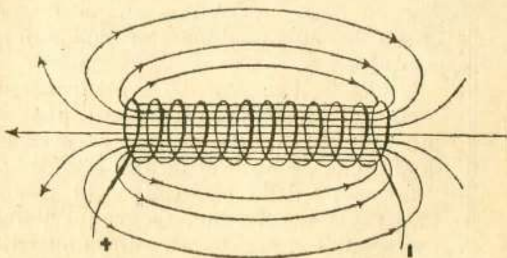


Fig. 459.

risulta costante, e il suo valore, per una corrente di intensità i e un numero n_1 di spire per unità di lunghezza, è:

$$\mathcal{H} = 4\pi n_1 i.$$

La direzione della forza è quella dell'asse andando dalla base sud alla base nord, perchè in questo verso un polo nord sarebbe sollecitato ad attraversare le spire (fig. 459).

Introduciamo ora nel mezzo di un lungo rocchetto NS un filo di ferro abbastanza lungo anch'esso, affinchè il magnetismo libero della sua estremità non produca perturbazione (fig. 460). Inserendo nel circuito della corrente un ampero-

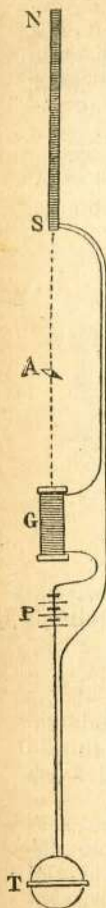


Fig. 460.

metro T e un reostato col quale si faccia variare gradatamente la intensità della corrente, si può misurare la intensità di calamitazione del ferro facendolo agire su un ago di declinazione A posto a conveniente distanza sul prolungamento dell'asse del rocchetto: questo poi deve essere normale al meridiano magnetico. Il rocchetto G serve a compensare l'azione del solenoide NS. Si è ottenuta così la curva di calamitazione che abbiamo riferito al § 377.

393. **Telegrafia.** — Le elettrocalamite hanno moltissime applicazioni: una delle più utili per la vita pratica è certamente quella che se ne è fatta alla *telegrafia.*

Lo scopo della telegrafia è di trasmettere rapidamente, anche a grandi distanze, dei segnali che rappresentino una lettera, una cifra, una parola. Noi dovremo contentarci di pochi cenni solamente sul telegrafo di Morse, che è quello più diffuso. Le parti essenziali sono la *linea,* la *pila,* il *manipolatore* o *tasto,* il *ricevitore* dei segnali.

Le linee per lo più sono aeree, e consistono in fili di ferro galvanizzati, ricoperti cioè da un leggero strato di zinco che preserva il ferro dalla ossidazione. I fili si appoggiano a isolatori di porcellana sostenuti da pali: quelli dei circuiti omnibus hanno circa il diametro di 4^{mm}. Le pile adoperate nei telegrafi sono comunemente del tipo Daniell.

Il manipolatore (fig. 461) consiste in una leva metallica girevole intorno all'asse A,

che si fa muovere agendo con la mano sul bottone *K*, allo scopo di stabilire alternativamente la comunicazione della linea con la pila o con il rice-

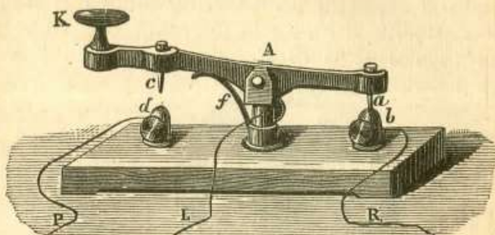


Fig. 461.

vitore. Quando, premendo sul bottone, si vince la resistenza della molla antagonista *f*, e si fa abbassare il tasto, si stabilisce il contatto fra *c* e *d*,

ALFABETO MORSE

A · —	H · · · ·	Q — — · —
Ä · — · —	I · ·	R · — ·
À · — — · —	J · — — —	S · · ·
B — · · ·	K — · —	T —
C — · — ·	L · — · ·	U · · —
Ch — — — —	M — —	Ü · · — —
D — · ·	N — ·	V · · · —
E ·	O — — —	W · — —
È · · — · ·	Ö — — — ·	X — · · —
F · · — ·	P · — — ·	Y — · — —
G — — ·		Z — — · ·

1 · — — — —	6 — · · · ·
2 · · — — —	7 — — · · ·
3 · · · — —	8 — — — · ·
4 · · · · —	9 — — — — ·
5 · · · · ·	0 — — — — —

Linea di frazione — — — — — —

mentre lo si interrompe fra a e b; e così si fa comunicare un polo della pila locale P con la linea L, e la corrente viene lanciata lungo questa: quando si cessa di premere, la molla f ristabilisce il contatto fra a e b, e la corrente che viene dalla linea va al ricevitore R.

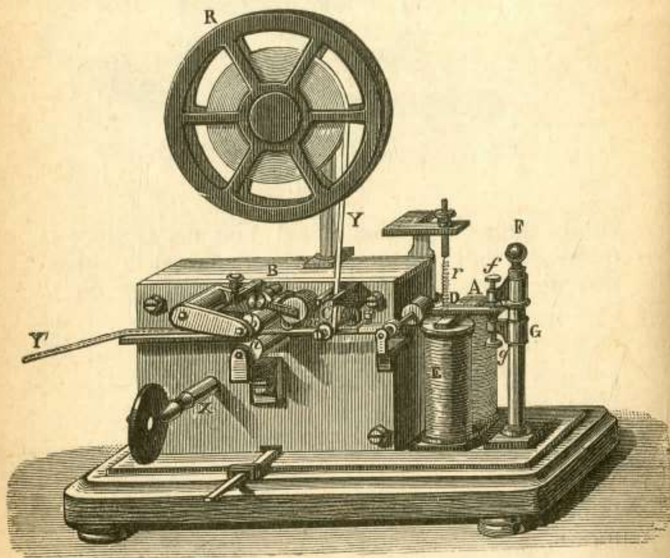


Fig. 462.

Il ricevitore di Morse, usato su larga scala, consiste essenzialmente in una elettrocalamita E a ferro di cavallo con i rami verticali (fig. 462); dinanzi ad essa v'ha un'àncora di ferro dolce fissata all'estremità di una leva di primo genere, e tenuta a breve distanza dai nuclei dell'elettrocalamita mediante

una molla antagonista *r*. Quando la corrente passa nell'elica magnetizzante, l'àncora si abbassa, senza però venire in contatto dei nuclei, e l'estremo *m* della leva a lei unita, movendosi verso l'alto, spinge una striscia di carta YY' contro una rotellina bagnata d'inchiostro da stampa: la striscia di carta si svolge da un tamburo *R* fra due cilindri *a*, *b* mossi da un congegno di orologeria caricato a molla. Al cessar della corrente, la molla antagonista *r* solleva di nuovo l'àncora dai nuclei smagnetizzati, e la carta cessa di toccar la rotellina. È chiaro che le traccie lasciate dall'inchiostro saranno più o meno lunghe secondo la durata della corrente; così si possono avere a piacere linee o punti che, per mezzo di un alfabeto convenzionale, permettono di leggere il dispaccio.

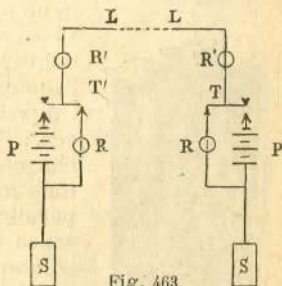
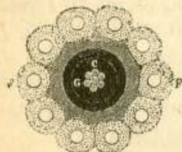


Fig. 463.

La fig. 463 rappresenta il modo più semplice di collegare fra loro due stazioni telegrafiche. Premendo il tasto *T*, si stabilisce la comunicazione del polo positivo della pila *P* con il filo di linea *L*, il quale, quando il tasto *T'* della seconda stazione riposa, comunica con il ricevitore *R*, e questo con la terra; e però una corrente passa dal punto di potenziale più alto *P* a quello di potenziale più basso. Allo stesso modo, nella seconda stazione, il polo negativo della pila comunica colla terra, e quello positivo, quando si preme il tasto *T'*, viene a comunicare con la linea *L* e con il ricevitore *R* della prima. Il circuito, come si vede, viene chiuso

dalla terra, e perciò basta un sol filo a stabilire la comunicazione. In entrambe le stazioni, il ricevitore può essere posto in R o in R': nel secondo caso i due ricevitori funzionano contemporaneamente, mentre nel primo caso il ricevitore di una stazione agisce solo quando arriva la corrente dell'altra.



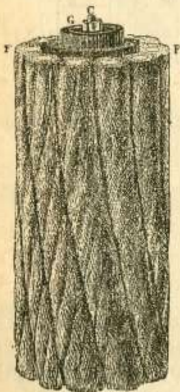


Fig. 464.

In ogni stazione telegrafica poi vi hanno degli accessori, come per esempio un galvanometro o *bussola telegrafica,* che consiste in un ago di declinazione in mezzo ad un telaio moltiplicatore di Schweiger, e serve ad indicare l'intensità della corrente e quindi i guasti, le possibili interruzioni, ecc.; il *parafulmine* o *scaricatore,* che consiste in due lastre di ottone munite di punte e affacciate parallelamente a breve distanza, senza però toccarsi; di esse una comunica col filo di linea, l'altra con la terra, dove quindi viene a scaricarsi, per effetto delle punte, una corrente di troppo alta tensione che invadesse la linea.

Nei telegrafi transoceanici i segnali vengono raccolti dall'ago di un delicato galvanometro, il quale con le sue deviazioni a destra o a sinistra, secondo il senso delle correnti trasmesse, indica *punti* o *linee.* La linea poi consiste in una gomena che si stende sul fondo del mare, formata da un fascio di fili di rame, ben isolati da più strati di guttaperca, e protetti da fili di ferro rivestiti di canapa incatramata (fig. 464).

394 **Sonerie elettriche.** — Le sonerie elettriche consistono anch'esse in una elettrocalamita *E* (figura 465), nella cui elica si fa circolare la corrente di una pila quando si chiude il circuito col premere un tasto *M*: un'àncora di ferro dolce portata da una molla oscilla dinanzi ai nuclei, aprendo e chiudendo il circuito nel punto *C*, e così un battaglio *B* viene a urtare contro un timbro sonoro.

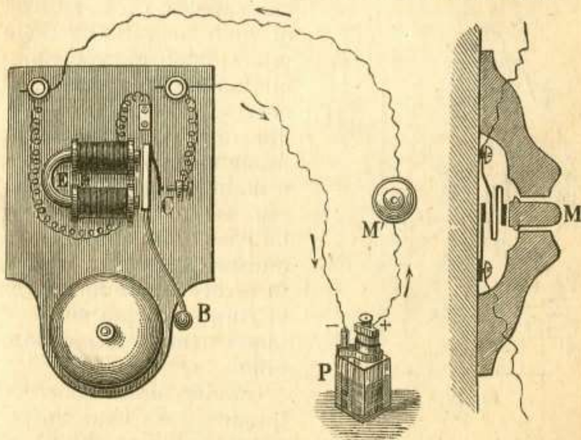


Fig. 465.

Invece che col tasto *M*, il circuito può esser chiuso dal mercurio di un termometro, che salendo nel tubetto viene a toccare un filo di platino saldato nel vetro, in corrispondenza a una determinata temperatura, come si usa negli *avvisatori di temperatura*; oppure può essere chiuso da una molla fissa ad una porta che si apra, ecc. Abbiamo già detto che in questa applicazione de' *campanelli elettrici*, presta buon servizio la pila Leclanché.

Nei *quadri* de' campanelli elettrici (fig. 466), sono disposte tante elettrocalamite munite delle relative ancore, quanti sono i bottoni per il servizio della casa. Il filo congiunto al polo positivo della pila *P* si divide in altrettanti rami, ciascuno dei quali passa per un bottone *B* e per l'elica della rispettiva elettrocalamita *E*: di poi codesti rami si riuniscono in un solo che si congiunge all'elica del campanello *C*, e ritorna al polo negativo *N* della pila. Quando si preme uno qualunque dei bottoni, la corrente passa per il ramo che vi corrisponde, fa suonare il campanello, e nello stesso tempo eccita la corrispondente elettrocalamita del quadro; questa, attirando l'àncora, fa alzare un numero che si rimette di poi subito a posto tirando un cordoncino.

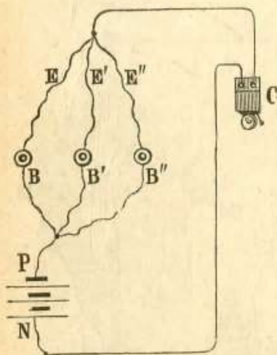


Fig. 466.

Quando non occorre il quadro, si usa spesso quest'altra disposizione molto semplice: due fili di rame isolati, comunicanti a un capo separatamente con i poli di una pila, corrono paralleli per le diverse stanze di una casa; in uno di essi è inserito un campanello elettrico, dopo del quale dall'uno e dall'altro filo si staccano de' circuiti derivati che si chiudono abbassando un tasto, e il campanello suona.

395. **Energia elettrica e lavoro meccanico.** — A tutti gli effetti che abbiam detto potersi raccogliere dalla corrente elettrica, bisogna aggiungere

anche il lavoro meccanico, come accade nei motori elettromagnetici.

Descriveremo il motore elettromagnetico Gramme-Pacinotti, che racchiude in germe i meravigliosi progressi fatti negli ultimi anni dalle applicazioni della elettricità.

Fra le branche *N*, *S* di una potente calamita permanente o di una elettrocalamita a ferro di cavallo (fig. 467), è girevole intorno al proprio asse *O* un anello di ferro dolce, sul quale è avvolto nello stesso senso, in più eliche *D E*, *D' E'*, *D'' E''*, ecc., un filo di rame isolato. Ad intervalli eguali, i capi contigui di due eliche consecutive vengono a saldarsi ad una striscia di rame piegata a squadra verso il centro, in modo che tutte le striscie vengono a far parte, senza toccarsi, della superficie dell'albero di rotazione dell'anello, formando quell'organo tanto importante detto *collettore*.

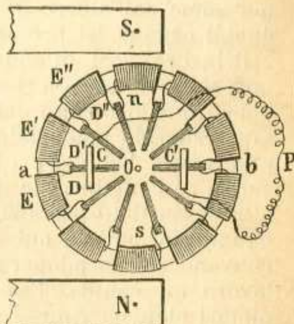


Fig. 467.

Quando due striscie opposte *C*, *C'* vengono toccate, mercè due spazzole di fili metallici, dai reofori di una pila *P*, la corrente si divide in due rami, e magnetizza ciascuna metà dell'anello di ferro in guisa da formare due elettrocalamite semicircolari con i poli omonimi affacciati; e se in *b* si desteranno due poli nord, in *a* si desteranno due poli sud. Allora i poli *N*, *S*, attirando i poli di nome contrario e respingendo quelli omonimi destati nell'anello, lo porranno in rotazione.

Nel movimento le spazzole unite ai reofori della pila vengono a contatto con due striscie successive, e nuovi poli si suscitano come prima nei punti *a* e *b* dell'anello; cosicchè persistendo la polarità di questo negli stessi punti, relativamente ai poli *N*, *S*, la rotazione continuerà: e se le successive striscie sono abbastanza vicine, in modo che i contatti con le spazzole unite ai reofori della pila si succedano rapidamente, la corrente non sarà mai interrotta, e la rotazione avverrà in modo uniforme. Si intende poi come dall'albero il moto possa trasmettersi a quegli organi del lavoro, che meglio piacerà.

Il lavoro così ottenuto dalla corrente elettrica non sarebbe però a buon mercato, e costerebbe più di quello fornito dalla macchina a vapore: infatti l'energia potenziale chimica dello zinco nella pila costa 120 volte più di quella del carbone; è vero che l'effetto utile delle macchine a vapore non oltrepassa il 10 per 100, mentre i motori elettrici danno più dell' 80; ma ad ogni modo non ci sarebbe convenienza ad adoperare le pile per eseguire un lavoro meccanico. Essendo così le cose, l'uso dei motori elettrici rimase per molto tempo limitato a quei casi nei quali, nulla importando la spesa, si esigevano regolarità e precisione nei movimenti; o s'imponeva la necessità di trasmettere l'energia con semplici fili di rame, senza quei complessi organi di trasmissione che sono le cinghie, gli ingranaggi, ecc.

La vera soluzione generale e pratica del problema di fornire all'industria uu motore elettrico economico, fu trovata dopo l'invenzione delle *dinamo*, e precisamente nel 1873 all'Esposizione di Vienna, quando il caso portò alla scoperta che la macchina suddetta è *invertibile:* che cioè, se essa fornisce energia meccanica quando vi si spende la

corrente elettrica, produce inversamente la corrente, quando le si comunica energia meccanica. A tal riguardo giustizia vuole però si dica, come tale invertibilità era stata segnalata dieci anni prima dal prof. Pacinotti, il quale descrivendo nel *Nuovo Cimento* il suo motore, aveva di già notato che esso poteva servire da motore e da generatore della corrente a un tempo.

CAPITOLO XIV.

Induzione elettromagnetica.

396. **Induzione elettromagnetica.** — Il lavoro meccanico che si ottiene col mezzo di un motore elettrico, è certamente una trasformazione dell'energia chimica spesa nella pila; e però questa energia è impiegata, parte a fornire il detto lavoro, parte a riscaldare la resistenza passiva del circuito.

L'intensità della corrente è pertanto più debole di quella che si avrebbe se il circuito si riducesse alla sola resistenza passiva; e nel motore elettromagnetico, dove l'energia della corrente è utilizzata, deve perciò stabilirsi una caduta del potenziale nel medesimo senso della corrente. Difatti, inseriamo nel circuito di una pila un motore elettromagnetico e un amperometro: se il motore riposa, noteremo una certa intensità di corrente; ma non si tosto, ubbidendo all'azione del campo, la sua armatura si sposta ed eseguisce un lavoro meccanico, la corrente diminuisce.

Siano e la caduta suddetta del potenziale, e i la intensità della corrente quando il motore lavora: l'energia da questo assorbita in ciascuna unità di tempo essendo eguale a $e\,i$, si ha, indicando con E

la forza elettromotrice della pila e con R la resistenza totale del circuito:

$$E i = e i + i^2 R;$$

e dividendo per i:

$$E = e + i R;$$

da cui si ha:

$$i = \frac{E - e}{R}.$$

Le cose avvengono dunque come se nel circuito si fosse introdotta una forza elettromotrice e contraria a quella della pila, avente per valore numerico il lavoro per secondo di ciascuna unità di corrente. Bisogna quindi concludere, che se il conduttore di una corrente elettrica si sposta obbedendo alle azioui di un campo magnetico e producendo del lavoro, si destano in esso delle forze elettromotrici di reazione opposte a quelle che vi mantengono la corrente.

Le medesime forze elettromotrici si desteranno poi naturalmente anche nel caso che il moto di quel conduttore, anzi che all'azione del campo magnetico, sia dovuto a una forza esterna; e poichè il fenomeno dipende unicamente dal flusso d'induzione attraversato e non dalla corrente del conduttore, è naturale che quelle forze elettromotrici si destino nel conduttore che si sposta, anche quando non sia attiva in esso altra corrente e l'esperienza conferma il fatto.

In generale, ogni qualvolta che, per una causa qualunque, varia il flusso di forza magnetica che attraversa un circuito, e che si dice *concatenato* col medesimo, prendono origine in esso delle forze elettromotrici; e se il circuito è chiuso, esse da-

ranno origine a correnti la cui durata è uguale a quella della variazione del flusso. È questo il fenomeno dell'*induzione elettromagnetica*; se il campo è dovuto a correnti, esso è detto più propriamente *induzione elettrodinamica*. Le forze elettromotrici e le correnti così generate sono dette *d'induzione*: la loro scoperta di immensa importanza è dovuta a Faraday (an. 1831), e noi ora diremo le esperienze e le leggi fondamentali che governano questo fenomeno.

397. **Induzione dovuta alle correnti.** — Un circuito $A' B'$ chiuso su sè stesso, contiene un galvanometro G (fig. 468); un secondo circuito $A B$

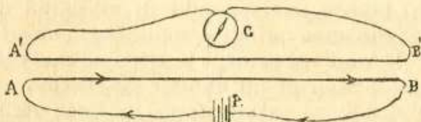


Fig. 468.

parallelo al primo per un buon tratto della sua lunghezza, è percorso dalla corrente di una pila P, e la corrente può essere a volontà stabilita, interrotta, ed anche invertita. Diremo il circuito $A' B'$ *circuito secondario o indotto*, e il circuito $A B$ *circuito primario o induttore.* Ogni volta che si stabilisce la comunicazione con la pila, il circuito $A' B'$ è percorso da una corrente indotta in senso contrario, ossia da una *corrente inversa* alla corrente induttrice; ciascuna volta invece che questa cessa interrompendosi il circuito della pila, si stabilisce nel circuito indotto $A' B'$ una corrente del medesimo verso di quella induttrice, o *diretta.*

Nessun fenomeno si manifesta nel circuito indotto, finchè il circuito induttore o primario è

percorso da una corrente costante e resa immobile; ma si ottiene una corrente indotta inversa nel filo *A' B'* ogni volta che si approssima il filo *A B*, o che si aumenta l'intensità della corrente inducente; e invece una corrente indotta diretta, se si allontana la corrente inducente o se ne diminuisce l'intensità.

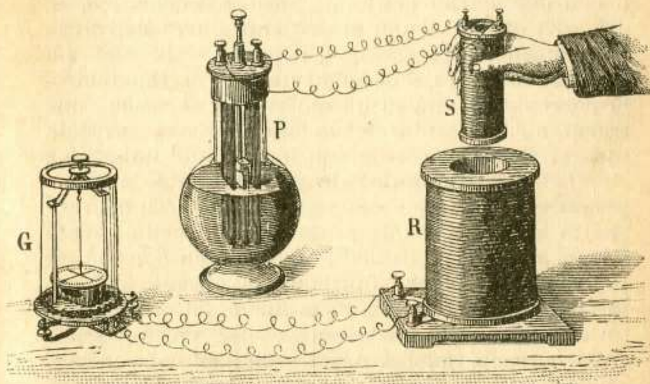


Fig. 469.

Insomma una corrente che si stabilisce nel circuito primario, una corrente che si avvicina o che aumenta d'intensità, dà origine in un circuito vicino ad una corrente indotta inversa; al contrario, una corrente che finisce, che si allontana o diminuisce d'intensità, produce una corrente indotta diretta. Si vede che queste correnti d'induzione elettromagnetica sono temporanee, hanno cioè luogo solamente quando l'azione magnetica nei singoli punti di un conduttore va soggetta a variazione; mancano affatto per tutto il tempo che la detta

azione si mantiene invece costante, qualunque del resto ne sia l'intensità; è poi superfluo dire che nei casi ora descritti, il campo magnetico è dovuto alla corrente rettilinea *A B* mantenuta dalla pila *P*.

Gli effetti sono tanto più intensi quanto più i due fili siano vicini e paralleli per una grande lunghezza; onde l'esperienza può farsi comodamente, o con due spirali piatte, o con due rocchetti *S*, *R*, (fig. 469) di cui l'uno si può introdurre nell'altro. Introducendo, per esempio, il primo congiunto alla pila nell'interno del secondo unito al galvanometro, la corrente indotta in questo risulta di senso contrario all'inducente: levandolo fuori, la corrente indotta riesce concorde con la corrente inducente.

398. **Induzione dovuta alle calamite.** — Sappiamo che il campo magnetico dovuto ad un rocchetto ha le medesime proprietà di quello dovuto ad un magnete rettilineo; in armonia con ciò, se nel rocchetto *R* che funziona da circuito indotto, si introduce una calamita in luogo del rocchetto *S*, gli effetti sono i medesimi; e per avere il senso delle correnti indotte, basta sostituire col pensiero alla calamita il cilindro elettromagnetico equivalente, secondo Ampère (§ 390). Parimenti ogni aumento dell'intensità della calamita produce una corrente inversa; ogni diminuzione una corrente diretta.

Si possono ottenere simultaneamente i due effetti d'induzione, e con una intensità ben maggiore, ponendo, quando è interrotto il circuito della pila, nell'interno del rocchetto indotto *R* il rocchetto induttore *S*, e nell'interno di questo un nucleo di ferro dolce: nel momento che la corrente si stabilisce, il cilindro di ferro dolce si calamita e le due azioni, quella della corrente e quella della calamita, evidentemente del medesimo senso, si sommano; esse si sommano del pari al momento della rottura del circuito primario.

399. **Induzione dovuta alla terra.** — Anche nel campo dovuto al magnetismo terrestre si destano le correnti d'induzione; cosicche lo spostamento di un circuito chiuso, di un rocchetto per esempio, nel campo terrestre, dà in generale una corrente indotta. Per convincersene, basta riunire i due capi di un rocchetto ai serrafili di un sensibile galvanometro: tenendo l'asse del rocchetto secondo l'ago di inclinazione e rovesciandolo bruscamente di 180°, si vedrà l'ago del galvanometro subito deviare, e poi tornare a zero. Per questa ragione, nello studio delle correnti d'induzione, è sempre meglio operare i cambiamenti di posizione relativa fra l'inducente e l'indotto, lasciando fermo quest'ultimo.

400. **Autoinduzione; estracorrente.** — Infine, Faraday ha mostrato che ogni variazione dell'intensità della corrente, provoca nel circuito stesso che la trasporta una corrente d'induzione che si sovrappone alla corrente principale, e tende sempre a contrariarne la variazione attuale d'intensità, indebolendo la corrente che cresce e rinforzando quella che decresce. Si tratta cioè di una induzione della corrente su sè stessa: al fenomeno si dà il nome di *autoinduzione*, e alla corrente che ne è il risultato il nome di *estracorrente*. L'autoinduzione ha per effetto, in ogni caso, di attenuare le variazioni di intensità della corrente principale nel circuito: questo effetto è paragonabile a quello dell'inerzia posseduta da un corpo in moto, per es. il volano di una macchina, in virtù della quale sono attenuate le brusche variazioni di velocità.

L'effetto di autoinduzione è cospicuo quando il circuito contiene dei rocchetti o delle elettrocalamite: in tal caso l'estracorrente è così intensa che all'apertura del circuito si ha una brillante e rumorosa scintilla, invece di quella meschina dovuta

all'incandescenza; e se il corpo di un essere vivente fa parte del circuito, risente degli effetti molto intensi.

401. **Unità d'induzione: henry.** — Se due circuiti, uno induttore e l'altro indotto, si pongono a distanza fissa, e nel primo si produce una variazione d'intensità Δi della corrente in un breve intervallo Δt, la forza elettromotrice indotta e viene espressa da:

$$(1) \qquad e = - M \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

nella quale il coefficiente M è detto *coefficiente d'induzione mutua* de' due circuiti. Il suo significato fisico è questo: esso rappresenta il flusso di forza da cui viene attraversato uno dei circuiti, quando nell'altro si stabilisca una corrente eguale all'unità. Il suo valore dipende solo dalle proprietà geometriche e dalla posizione relativa de' due circuiti.

Dunque *la forza elettromotrice d'induzione è eguale, a ciascun istante, al prodotto del coefficiente d'induzione mutua per la velocità di variazione della corrente induttrice.* Il segno — indica che il senso della corrente indotta è contrario a quello della corrente induttrice.

Ora se nella (1) si fa $\Delta i = 1$, $\Delta t = 1$, $e = 1$, risulta pure $M = 1$: nel sistema industriale di misure a questo valore di M si dà il nome di *henry*, dal nome del fisico americano Henry. Vale a dire, *se in un circuito soggetto a induzione si desta la forza elettromotrice di 1 volta, quando la intensità della corrente induttrice varia di 1 ampère per secondo, esso è soggetto alla induzione unitaria di 1 henry.*

402. **Leggi dell'induzione; legge di Lenz.** — Tutti questi fenomeni d'induzione hanno, come si è notato sopra un carattere comune, che è quello

di essere suscitati da una modificazione del campo magnetico nel quale si trova il circuito indotto, tanto se il campo è dovuto a delle correnti o a delle calamite esterne, quanto alla corrente medesima che percorre il circuito. Restano ora a vedersi le leggi che governano il senso e la grandezza di tali correnti indotte. Quanto al senso serve la *legge di Lenz*, la quale si enuncia così: *se si sposta un conduttore chiuso in prossimità di una corrente o di un magnete, deve circolare in esso una corrente tale che, reagendo sulla corrente o sul magnete, tenda ad opporsi al moto che l'ha destata.*

Accade la medesima cosa se quel conduttore si tien fermo e si sposta invece la corrente o il magnete. Anche qui si verifica dunque il principio fondamentale, che ad ogni azione si oppone una reazione eguale e contraria.

Quanto alla grandezza osserviamo che la quantità $M \,.\, \Delta i$ che compare nella (1) del § precedente, esprime la variazione, durante il tempo Δt, del flusso di forza che emana dal circuito induttore e passa per la faccia negativa dell'indotto. Si deduce che *la forza elettromotrice indotta è espressa dalla velocità con cui varia il flusso di forza che attraversa il circuito indotto, o concatenato con esso, qualunque del resto sia la causa che faccia variare il flusso.*

Il suo valore è inoltre indipendente dalla forza elettromotrice che può essere attiva nel circuito; onde essa sarebbe la stessa, anche quando quest'ultima fosse nulla, ossia quando il circuito fosse un semplice conduttore chiuso su sè stesso.

Pertanto, se indicheremo con $\Delta \mathcal{H}$ la variazione nel tempuscolo Δt del flusso di forza attraverso a un circuito di resistenza r, la forza elettromotrice e

indotta in questo, e l'intensità i della corrente saranno espresse da:

$$(2) \qquad e = i\,r = -\frac{\Delta \mathcal{H}}{\Delta t}.$$

Si deduce che:

$$(3) \qquad i = -\frac{1}{r}\frac{\Delta \mathcal{H}}{\Delta t};$$

e la quantità totale di elettricità q messa in circolazione nel tempo Δt è data da:

$$(4) \qquad q = i\,.\,\Delta t = -\frac{\Delta \mathcal{H}}{r},$$

ossia dalla variazione del flusso divisa per la resistenza del circuito.

Se $\Delta \mathcal{H}$ è positivo, vale a dire se il conduttore abbraccia un maggior flusso di forza, la forza elettromotrice, e in conseguenza la corrente indotta, saranno negative o *inverse;* se invece $\Delta \mathcal{H}$ è negativo, se cioè il flusso che attraversa il circuito diminuisce, la forza elettromotrice e la corrente indotta sono positive, ossia *dirette.*

103. **Regola di Fleming.** — La direzione di codesta forza elettromotrice d'induzione si può assegnare in questa maniera indicata da Fleming: si tendano le prime tre dita, stavolta, della mano destra (fig. 470) puntando l'indice nella direzione del campo, e voltando il pollice nella direzione del moto, il medio adagiato lungo un tratto del conduttore, indicherà la direzione che prende in esso la corrente indotta. Tale regola può servire utilmente in qualunque caso.

Per chiarire la cosa con un esempio, consideriamo un circuito formato da due conduttori pa-

ralleli $A B$, $A' B'$, da un filo che chiude il circuito agli estremi $A A'$, e da un filo conduttore $C C'$ che si muove nel verso della freccia lungo $A B$, $A' B'$ (fig. 471). Se il circuito si trova in un campo magnetico $\mathfrak{H}$ diretto nel verso della freccia grande normalmente al piano delle rette $A B$, $A' B'$, la

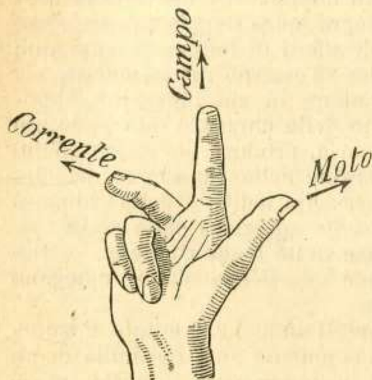


Fig. 470.

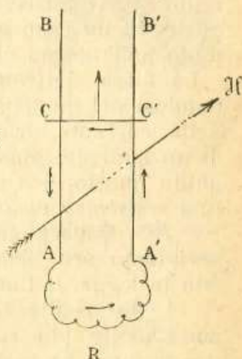


Fig. 471.

forza elettromotrice e la corrente saranno dirette nel verso delle freccie secondo $C' C A A' C'$. Il lettore può da sè verificare la legge suddetta di Fleming.

404. **Forza elettromotrice di autoinduzione.** — Ritornando ora al fenomeno dell'autoinduzione, si intende dalle cose dette che, per una data intensità della corrente principale, la *forza elettromotrice di autoinduzione* sarà tanto più grande, quanto maggiore sarà la variazione del flusso magnetico abbracciato dallo stesso circuito; e quindi essa avrà anche in tal caso un valore più alto per

un rocchetto munito di nucleo di ferro, che per un rocchetto senza ferro; sarà maggiore per un rocchetto di un gran numero di spire che per un rocchetto costituito da poche spire.

Inoltre è evidente che gli effetti di autoinduzione sarebbero soppressi in un rocchetto che avesse il conduttore piegato in doppio, di guisa che la corrente attraversasse ogni spira doppia in senso opposto. In tal caso gli effetti di induzione sono nulli tanto nell'interno che all'esterno del rocchetto.

La forza elettromotrice di autoinduzione, opponendosi nel momento della chiusura allo stabilirsi della corrente primaria, produce lo stesso effetto di un aumento apparente della resistenza del circuito; questo cioè presenta nell'atto della chiusura una *resistenza apparente* maggiore della reale.

405. **Conseguenze della legge di Lenz.** — Descriviamo ora alcune esperienze che si spiegano con la legge di Lenz.

1.° Le oscillazioni di un ago calamitato si smorzano molto più rapidamente in prossimità di un conduttore che non in lontananza: è questa un'antica osservazione fatta nel 1824 dal Gambey, e si utilizza il fenomeno per spegnere le oscillazioni degli aghi delle bussole e dei galvanometri, i quali, quando sono circondati da una massa di rame, si fermano ben presto, come se vi fosse un attrito che ne smorzasse le oscillazioni. Difatti si immagini un ago calamitato che oscilli al di sopra di una massa di rame; come vuole la legge suddetta, si susciteranno nella regione a cui si avvicina delle correnti d'induzione che lo respingono, e nella regione dalla quale si allontana delle correnti che invece l'attirano.

2.° Se si sospende a un filo un cubo di rame tra i poli di un'elettrocalamita e si torce il filo di so-

spensione, il cubo, abbandonato a sè stesso, prende un rapido movimento di rotazione; ma per la ragione detta prima, si arresta subito, se si eccita l'elettrocalamita (fig. 472). Questa esperienza è dovuta a Faraday. Se il cubo è fatto di striscie di rame alternate con striscie di cartone, come operò il Matteucci, esso invece continua inalterato il suo moto, perchè le correnti indotte non possono stabilirvisi.

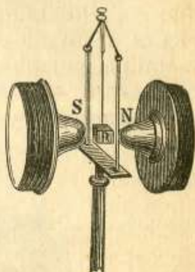


Fig. 472.

3.° Un ago calamitato *NS* sospeso ad una punta su una lastra di vetro che copre una cassa di legno (fig. 473), si mette a rotare nel medesimo verso di un disco di rame sottoposto. Anche



Fig. 473.

qui nei punti che si avvicinano a ciascun polo si destano delle correnti che lo respingono, e nei punti

che si allontanano si destano correnti che lo attirano. Ed a conferma sta il fatto, che tagliando il disco in tanti settori, con la qual cosa s'impedisce il passo alle correnti indotte, l'ago non ruota: questa esperienza è dovuta ad Arago. Inversamente, un disco metallico poggiato in bilico su una punta, si mette a girare se al disotto si fa rotare rapidamente una calamita a ferro di cavallo.

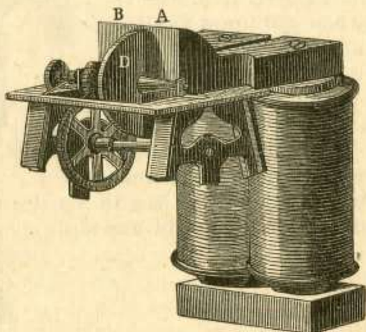


Fig. 474.

4.° Un disco di rame *D* è fatto girare con grande velocità per mezzo di un sistema di ruote dentate, fra le espansioni polari *A* e *B* di una potente elettrocalamita (fig. 474). Quando questa non è eccitata dalla corrente, per mettere in moto il disco non c'è che da vincere l'attrito dei perni e la resistenza dell'aria; ma appena la corrente è lanciata nell'elica magnetizzante, il disco è frenato dalla reazione delle correnti indotte che si sviluppano. Se allora si vuol continuare a farlo girare, bisogna spendere un lavoro considerevole per vincere le azioni magnetiche fra la elettrocalamita e

le correnti d'induzione, tanto maggiore quanto più grande è la velocità. Come corrispettivo del lavoro consumato si svolge una quantità equivalente di calore, e il disco si scalda fortemente. Questa esperienza elegantissima è dovuta a Foucault; essa è un bell'esempio della trasformazione dell'energia meccanica in calore senza visibile attrito.

Si dà il nome di *correnti di Foucault* alle correnti indotte nelle masse metalliche, per esempio nel nucleo di un'elettrocalamita, ogni qualvolta varia l'intensità della corrente nell'elica che l'avvolge. Il riscaldamento che ne è la conseguenza, diviene considerevole quando il filo è percorso da una serie rapida di correnti interrotte, ovvero da correnti alternative, come succede nei trasformatori dei quali parleremo in seguito.

Si attenuano di molto il riscaldamento e la perdita di energia che ne deriva, formando il nucleo con fili di ferro isolati, ovvero con sottili lamine parallele all'asse del rocchetto, e quindi perpendicolari alla direzione secondo la quale le correnti d'induzione tendono a prodursi.

5.° Un'altra conseguenza curiosa della legge di Lenz è che non si riesce a dare un colpo secco con una lastra di rame sulle faccie polari di una forte elettrocalamita, perchè le correnti indotte che si generano nella massa di rame col rapido suo avvicinamento sono respinte.

406. **Carattere delle correnti indotte.** — Le estracorrenti influiscono notevolmente sulla durata delle correnti indotte che si destano nel circuito secondario alla chiusura ed all'apertura del primario, e propriamente la *corrente indotta di chiusura dura piu di quella di apertura.* Ne viene che la forza elettromotrice della corrente indotta all'apertura del primario, è maggiore di quella che

corrisponde alla chiusura (§ 402), e lo stesso succede delle rispettive correnti; entrambe queste però, corrispondendo alla stessa variazione totale del flusso, trasportano una eguale quantità di elettricità. Questo fatto, e in generale tutte le altre leggi delle correnti d'induzione, vennero dimostrate per via di esperienze dal Felici.

In conclusione, mentre la quantità di elettricità indotta non dipende dal tempo nel quale si compie una data variazione della corrente induttrice, o, ciò che è lo stesso, del flusso magnetico, all'incontro la forza elettromotrice, e in conseguenza la intensità della corrente indotta, riescono, come indica la (3) del § 402, tanto maggiori quanto più rapida è quella variazione. In ogni caso la durata brevissima delle correnti indotte all'aprirsi e al chiudersi del circuito primario, fa si che la forza elettromotrice d'induzione sia grandissima, paragonabile a quella delle macchine elettrostatiche; onde alle estremità del filo del rocchetto indotto si producono, per un istante, differenze di potenziale cosi elevate, da dar luogo nell'aria a scintille di parecchi centimetri, mentre la forza elettromotrice della pila inserita nel circuito primario è di pochi volta. Siccome poi la forza elettromotrice d'apertura è maggiore di quella di chiusura, cosi la distanza esplosiva che corrisponde alla corrente indotta diretta, supera l'altra dovuta alla corrente indotta inversa.

Le curve della fig. 475 rappresentano l'andamento delle correnti inducente e indotta: i tempi sono contati sull'asse delle ascisse $O\,X$ per le correnti inducenti e sull'asse $O'\,X'$ per le correnti indotte; le ordinate rappresentano rispettivamente le intensità delle dette correnti.

Alla chiusura del circuito, la corrente primaria cresce secondo la curva $O\,A$, e le corrisponde

un'onda di corrente indotta di chiusura rappresentata dalla curva $O'\ I'\ A'$, la quale cresce, raggiunge il massimo valore I', per decrescere e annullarsi in A'.

Quando la corrente inducente ha raggiunto il suo stato di regime rappresentato dal tratto $A\ B$, la forza elettromotrice e la corrente indotta sono nulle come è rappresentato in $A'\ B'$.

All'apertura del circuito, la corrente primaria non scende subito a zero, anzi in principio si esalta da B in C prima di annullarsi in D: le corri-

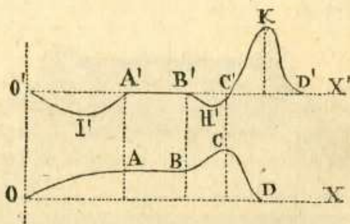


Fig. 475.

sponderà quindi la corrente indotta $B'\ H'\ C'\ K'\ D'$, la quale raggiunge rapidamente il massimo in K'. La quantità di elettricità rappresentata dall'area $C'K'D'$ impegnata nella corrente indotta diretta, deve essere eguale alla somma delle aree $O'\ I'\ A'$ e $B'\ H'\ C'$, la quale rappresenta la quantità di elettricità impegnata nella corrente indotta inversa. Si vede pertanto che l'intensità massima della indotta diretta, in grazia della minor sua durata, deve superare quella dell'inversa, come si è detto. È evidente poi che, stabilendosi e interrompendosi di nuovo la corrente induttrice, si ripetono le medesime vicende.

Si cerca di rendere minimi i periodi di permanenza della corrente inducente nei quali non si hanno correnti indotte, aumentando la rapidità delle interruzioni; si costruiscono a tale scopo interruttori meccanici con i quali non è difficile raggiungere un buon numero di interruzioni al secondo. In ogni caso si vede dal diagramma che la corrente indotta è alternativa, mentre quella inducente non lo è.

407. **Rocchetto di Ruhmkorff.** — Tutti questi fatti possono essere comodamente mostrati con la

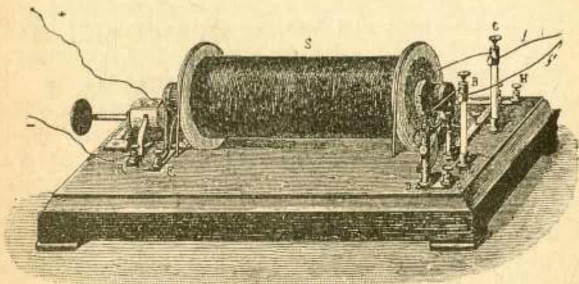


Fig. 476.

macchina o *rocchetto di Ruhmkorff*, nella quale, col mezzo di una corrente fornita da un generatore di piccola forza elettromotrice, si ottiene, per le ragioni esposte, ai capi del filo indotto una elevata forza elettromotrice, capace di dare lunghe scintille, di caricare batterie, di riprodurre insomma tutti gli effetti delle macchine elettrostatiche.

La fig. 476 mostra questa macchina nel suo insieme, mentre le fig. 477 e 478 ne rappresentano rispettivamente la vista dall'alto, e quella di fronte a una estremità.

Si compone essa di un nucleo di ferro dolce di forma cilindrica, costituito da un fascio di fili paralleli, su cui è avvolto il filo primario; esso è

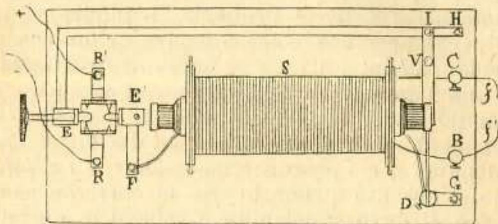


Fig. 477.

abbracciato dal rocchetto indotto, composto di parecchie migliaia di giri di un filo sottile bene isolato, le cui estremità finiscono ai serrafili *B* e *C*

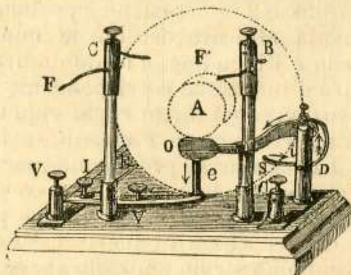


Fig. 478.

detti i poli della macchina. Nel suo avvolgimento si procura che, mentre il potenziale va crescendo da un'estremità all'altra del filo, non si trovino giammai vicini due strati ad una troppo grande

differenza di potenziale. I reofori della pila vanno in R, R' ad un *commutatore* (fig. 477), che permette o di stabilire le comunicazioni $R\,E'$, $R'\,E$, oppure $R\,E$, $R'\,E'$, così da invertire a piacere la corrente nel rocchetto primario. L'induzione avviene per l'apertura e la chiusura della corrente primaria: tali interruzioni si fanno ordinariamente mercè un pezzo di ferro O posto al disotto dell'estremità A del nucleo (fig. 478). Il martello $O\,D$ che fa da áncora rispetto al nucleo dei fili di ferro A, l'incudine e, e i pezzi corrispondenti $V\,I\,e$, fanno parte del circuito primario. Se la corrente passa, il nucleo di ferro si calamita e solleva il martello; la corrente è allora interrotta; ma si stabilisce di nuovo, appena, smagnetizzandosi il ferro, il martello ricada sull'incudine.

Così si ha una successione rapida di aperture e di chiusure, ciascuna delle quali suscita nel rocchetto secondario la corrispondente corrente indotta. La durata dell'interruzione è prolungata dalla scintilla dovuta all'estracorrente la quale scocca tra il martello e l'incudine, e fa diminuire la forza elettromotrice d'induzione corrispondente. Per rendere l'interruzione più netta e più rapida, si può adoperare l'interruttore di Foucault, nel quale la chiusura e l'apertura si producono per mezzo di una punta di platino che pesca nel mercurio, e col solito mezzo di un'áncora di ferro dolce prende un movimento di va e vieni: in questo caso si ricopre il mercurio con uno strato piuttosto spesso di alcool o di altro liquido coibente (petrolio).

Questo interruttore è rappresentato dalla fig. 479: la piccola elettrocalamita che si vede alla destra viene eccitata da due o tre Daniell; la corrente vi entra per Q, circola nell'elica magnetizzante, poi passa per la molla verticale E, e per la punta di

platino *S* nel mercurio del pozzetto che è collegato col reoforo di ritorno *P*. Così l'áncora di ferro dolce *F* viene attirata; ma allora, interrompendosi il circuito, la molla *E* la riconduce indietro, e il pezzo metallico *F T* compie delle oscillazioni tanto più rapide quanto più basso è il contrappeso *C*. Ora in *T* è una seconda punta di platino che sfiora anch'essa il mercurio del suo pozzetto, e così viene

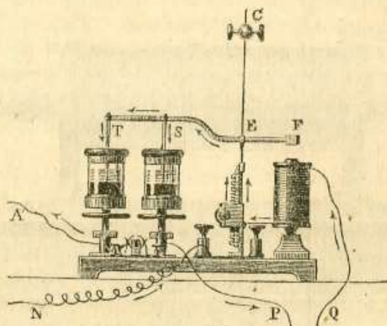


Fig. 479.

interrotta periodicamente la corrente che per *N T A* alimenta il primario della macchina di Ruhmkorff.

408. **Aggiunta del condensatore.** — La durata della corrente indotta d'apertura diminuisce ancor più, e con ciò aumenta la lunghezza delle scintille ottenibili, mettendo in derivazione fra l'incudine e il martello le armature di un condensatore: tale condensatore è costituito da più fogli di stagnola alternati con fogli di carta paraffinata, e il tutto è racchiuso nella base dell'istrumento. Al momento della rottura del circuito, la maggior parte del flusso elettrico, invece di superare l'interruzione tra l'incudine e il martello, va a cari-

care il condensatore, il quale poi si scarica sotto forma oscillante attraverso il filo primario. Nel momento della prima oscillazione, la corrente è inversa a quella della pila, ed accelera la smagnetizzazione del fascio di fili di ferro, producendo una variazione del flusso magnetico attraverso le spire secondarie sensibilmente doppia. L'effetto di questo condensatore, che venne per la prima volta

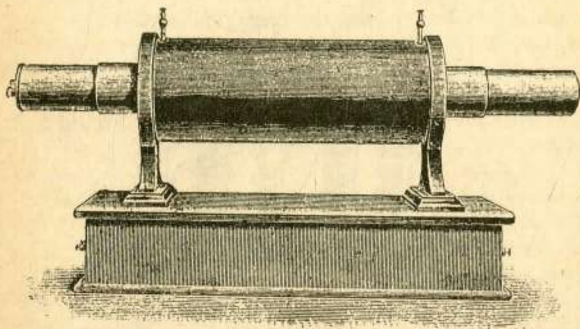


Fig. 480.

aggiunto dal Fizeau, è massimo quando la durata d'oscillazione è la stessa nei due circuiti, primario e secondario.

I rocchetti che si costruiscono oggi non differiscono molto, in sostanza, dal rocchetto di Ruhmkorff descritto. Sono per lo più completamente rivestiti di ebanite (fig. 480); hanno l'induttore più lungo del rocchetto indotto, e lo si può spostare entro un tubo di ebanite; ciò serve, volendo, a regolare gli effetti: l'interruttore è separato.

Eccellenti sono i rocchetti dell'Allgemeine-Elektrizitäts Gesellschaft di Berlino, e quelli del Campo-

stano e del Balzarini di Milano. La cosa più difficile nella costruzione di un rocchetto è l'isolamento dell'indotto: gli isolanti solidi, in seguito alle variazioni di volume e all'ozono prodotto dalle scariche, col tempo si screpolano e si alterano, in modo che l'isolamento diventa di più in più difettoso; allora la scarica può accadere nell'interno, e il rocchetto è guasto. I migliori isolanti sono pertanto quelli che concedono una certa libertà di variazione di volume alle diverse parti senza screpolarsi, e che inoltre sono meno soggetti ad alterarsi. Il rendimento elettrico di un rocchetto, ossia il rapporto fra la energia consumata nel primario e quella ricavata dal secondario, supera difficilmente il 20 %.

409. **Altre specie d'interruttori; interruttore Wehnelt.** — L'interruttore di Foucault è lento; un interruttore a mercurio rapido e che presta un ottimo servizio, è quello del Campostano: esso è rappresentato dalla fig. 481.

Un motorino elettrico ad asse verticale trasmette per mezzo di una piccola cinghia e di due puleggie il movimento ad un altro asse verticale: questo porta in basso due piccoli ingranaggi a 90°, al secondo dei quali è unita una losanga di acciaio temperato che ruota, e nel girare s'immerge con una punta nello strato di mercurio posto nel fondo di un vaso di vetro, e poi rapidamente se ne distacca: il mercurio si ricopre con petrolio. Con una resistenza addizionale si regola la velocità di rotazione; si possono avere parecchie centinaia di interruzioni al minuto primo.

Quando le interruzioni sono così frequenti, bisogna disporre, per alimentare il primario, di una sorgente a potenziale piuttosto elevato (100 volta circa); in caso contrario, si otterrebbero minori

effetti. Tale diminuzione della forza elettromotrice indotta sarebbe dovuta al tempo che il ferro impiega a smagnetizzarsi: con le interruzioni molto frequenti il campo magnetico non arriva ad annullarsi, e quindi è necessario aumentare la forza

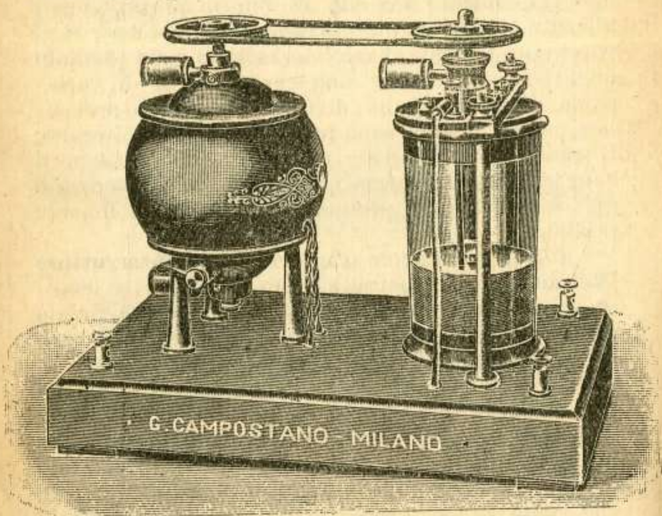


Fig. 481.

elettromotrice della corrente inducente, e con essa il valore massimo del campo magnetico.

A questi reotomi meccanici si può sostituire con vantaggio quello del prof. Wehnelt, fondato sull'azione elettrolitica della corrente; esso, oltre a permettere la utilizzazione d'una corrente di maggiore intensità, è di costruzione semplice e di facile uso. Il fenomeno su cui si fonda venne già osservato

da Planté, lo scaldamento cioè che subisce un elettrodo di piccole dimensioni affacciato ad uno assai più ampio nell'acqua acidulata di un voltametro, quando la forza elettromotrice è piuttosto elevata.

Il fenomeno è stato utilizzato dai signori Lagrange ed Hoho, per portare i metalli ad alta temperatura. L'elettrolito è in tal caso una soluzione di potassa nell'acqua; l'anodo è formato da una grande lastra di piombo, e serve da catodo il pezzo che si vuole arroventare, fondere o temperare. La parte immersa si copre di una guaina d'idrogeno che oppone una forte resistenza alla corrente, cosicchè per l'effetto Joule l'energia elettrica si trasforma completamente in calore.

Nell'interruttore Wehnelt le parti sono invertite: il catodo è ampio, e l'anolo è piccolo. Funziona da catodo un'ampia lastra di piombo immersa nell'acqua acidulata con acido solforico, e da anodo un filo di platino compreso in un tubetto di vetro o di altra materia coibente, dal quale la punta sporge soltanto per alcuni millimetri.

Tosto che la differenza di potenziale fra i due elettrodi, dovuta a una corrente continua, raggiunge un valore sufficiente, si forma una specie di guaina luminosa intorno all'anodo di platino, la quale è accompagnata da un rumore caratteristico prodotto da una serie di piccole esplosioni; il circuito è interrotto difatti periodicamente dall'inviluppo gasoso che si forma intorno all'anodo, e il numero delle interruzioni può essere assai elevato (da 1500 a 2000 al minuto secondo).

L'interruttore Wehnelt pertanto, messo sul primario di una macchina del Ruhmkorff, funziona con grande frequenza; e l'uso ne ha confermato l'esattezza e precisione del funzionamento, al che

contribuisce l'autoinduzione del primario. Questo interruttore serve egregiamente tanto con rocchetti potenti, che con rocchetti mediocri: in grazia di esso si sopprime il condensatore che diventa superfluo, il che porta una notevole semplificazione nella costruzione della macchina. La fig. 482 mo-

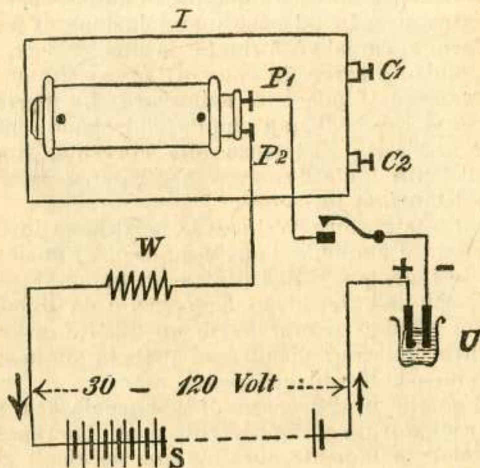


Fig. 482.

stra lo schema del circuito, che non ha bisogno di ulteriori spiegazioni.

Questo interruttore agisce anche colle correnti alternate; nel qual caso esso non dà passo alla corrente che in una sola direzione, dall'anodo al catodo. Con le correnti alternate però l'anodo di platino si consuma rapidamente, il che non succede con le correnti continue.

L'intensità della corrente che attraversa l'acqua acidulata si può aumentare, sia diminuendo la resistenza esterna, sia facendo sporgere di più, dal tubetto che la custodisce, la punta di platino. Nel primo caso cresce la frequenza delle interruzioni;

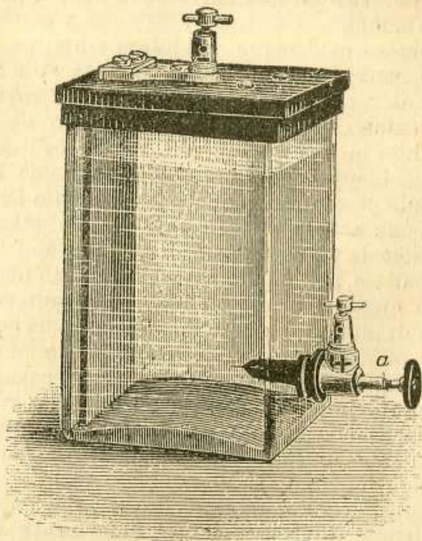


Fig. 483.

nel secondo queste si rallentano alquanto, ma aumenta l'intensità delle scintille di scarica. La fig. 483 rappresenta la forma data all'interruttore Wehnelt dall'Ernecke di Berlino: nella tazza parallelepipeda piena di acqua acidulata è immersa, lungo una parete verticale, una lastra di piombo che fa da

catodo, ed è unita al serrafilo nel centro del coperchio: in basso, attraverso a un foro, penetra a perfetta tenuta la verghetta di platino *a* (anodo) circondata da un inviluppo coibente: una vite colla testa di ebanite permette di farla sporgere più o meno, per regolare la corrente e la frequenza dell' interruzioni.

La massa dell' acqua acidulata conviene che sia grande, perchè, in caso diverso, essa si scalda rapidamente, e quando arriva a un 80° l' interruttore non funziona più. Sotto questo punto di vista è preferibile la forma data all' interruttore dal Campostano. L'apparecchio si compone di una bottiglia di Woulf di grande capacità, contenente acqua acidulata con acido solforico al 10 % (fig. 484); per un collo laterale passa un'asta di piombo che funziona da catodo, e per quello di mezzo si immerge nel liquido un tubo di vetro che porta all'interno un'asticina di platino iridiato (anodo), la quale per mezzo di vite può alzarsi od abbassarsi girando un bottone isolante. L'asticina di platino poi passa a sfregamento, prima entro un turacciolo di gomma che impedisce l'elevamento del liquido, di poi in un piccolo tubo di vetro pure sostenuto da un altro turacciolo di gomma. Viene adoperata la bottiglia di Woulf perchè comoda; non vi sono guarnizioni metalliche che possano essere deteriorate dalla soluzione acida. Il terzo collo munito di tubo, come mostra la figura, serve allo svolgimento de' gas, ma se ne può fare a meno.

Lo stesso tipo serve per corrente alternata, sostituendo al platino iridiato l'acciaio, al piombo il ferro, ed alla soluzione d'acido solforico una soluzione di carbonato di potassio che varia dal 10 % al 30 %, a seconda della forza elettromotrice di cui si dispone e dell'autoinduzione del primario del

rocchetto. La sostituzione di questo materiale all'altro si fa unicamente, perchè colla corrente al-

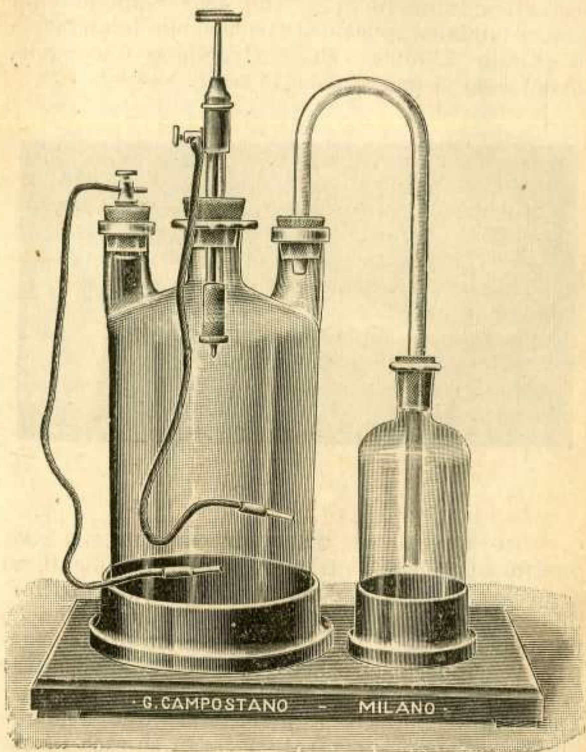


Fig. 484.

ternata il platino si disaggrega rapidamente, come si è notato, ed il costo di funzionamento s'eleverebbe assai.

Le scintille di un Ruhmkorff, quando le interruzioni sono operate col Wehnelt, sono simili a un tratto continuo di fuoco (fig. 485). Soffiando sul nastro luminoso, questo si divide subito in un fascio di scintille. L'impiego di tale reotomo è comodo, facile; esso si presta bene in ogni caso.

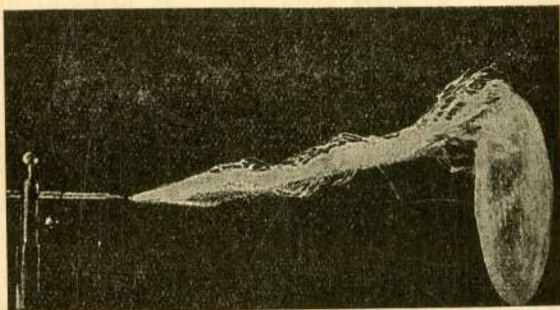


Fig. 485.

410. **Carica di una batteria con un rocchetto.** — Mercè tutti questi perfezionamenti, si sono potute costrurre macchine di Ruhmkorff formidabili, che danno nell'aria scintille lunghe anche un metro fra una punta positiva e un disco negativo, le quali riuscirebbero certamente letali attraversando un corpo vivente.

Quando la punta è positiva, le scintille sono più lunghe e vanno al centro del disco; se essa invece è negativa, le scintille sono più brevi e scoccano all'orlo del disco.

Riunendo i due estremi *B* e *C* del circuito indotto ad uno scaricatore *I H*, quando *I* ed *H* sono

abbastanza vicini, le scintille accadono tanto alla chiusura che all'apertura; ma quando si allonta-

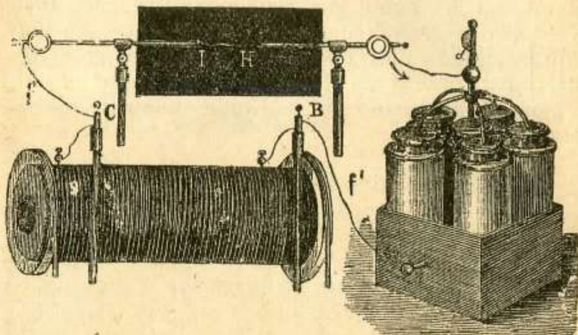


Fig. 486.

nano progressivamente, le scintille passano solamente all'apertura. Il rocchetto fornisce allora una

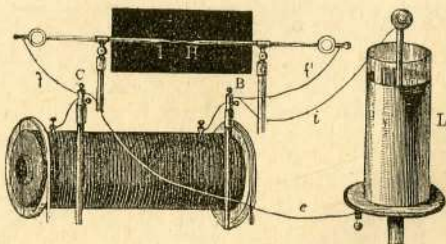


Fig. 487.

corrente interrotta sempre del medesimo senso, che può caricare una batteria (fig. 486).

Se i due poli B e C si fanno comunicare con le armature di un condensatore L (fig. 487), il quale aumenta la capacità dei fili, le scintille si accorciano, ma si fanno più risplendenti e rumorose. Nel caso di grandi rocchetti, difficilmente una bottiglia di Leida potrebbe sopportare l'enorme differenza di potenziale che si stabilisce fra i due poli, e però si impiegano più bottiglie disposte in cascata.

CAPITOLO XV.

Raggi catodici, Raggi X. Radioattività.

411. **Scariche ne' gas rarefatti. — Raggi catodici.** — Al § 335 abbiamo parlato della scarica ne' gas rarefatti: ora vogliamo entrare in qualche particolare al riguardo. Mentre nell'aria libera la scarica assume la forma di scintilla se ha luogo fra elettrodi di non troppa grande curvatura, o quella di stelletta o fiocco nel caso contrario, nell'aria rarefatta invece essa subisce graduali modificazioni, finchè giunge a dividersi in due parti ben distinte, dette *luce positiva* e *bagliore:* la prima rosea o rossa, si estende dall'anodo per un certo tratto; il secondo azzurro-violaceo, parte dal catodo; fra le due luci poi rimane un intervallo oscuro, chiamato *spazio oscuro di Faraday* (fig. 488 n.° 1). Se si continua a far diminuire la pressione dell'aria, la colonna luminosa positiva, spesso stratificata, si contrae ritirandosi verso l'anodo, mentre il bagliore si estende di più sull'intero catodo (n.° 2); poi esso si stacca dal catodo, sul quale resta però uno strato luminoso che può chiamarsi *primo strato negativo* (n.° 3), separato dal bagliore o *secondo strato negativo,* per mezzo di un intervallo detto *spazio oscuro del catodo,* od anche *spazio oscuro di Hittorf,* il quale primo l'osservò.

Man mano che la rarefazione prosegue, lo spazio oscuro negativo aumenta (n. 4), finchè non resta

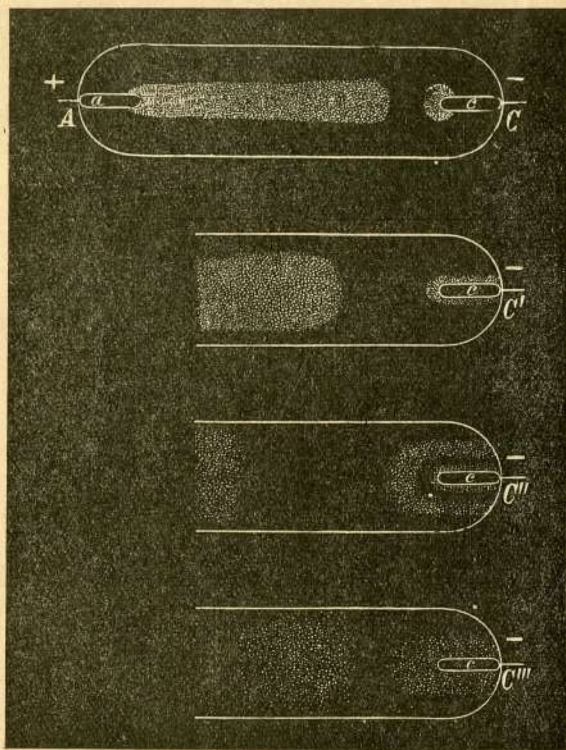


Fig. 488.

più visibile che una parte sempre più piccola del bagliore o secondo strato negativo in contatto delle pareti del tubo, entro il quale si osservano le successive vicende della scarica.

Quando si è giunti all'ultima fase descritta, prendono origine nel tubo i meravigliosi fenomeni, attribuiti ai così detti *raggi catodici*. Questi fenomeni difatti appaiono come prodotti da raggi rettilinei, emessi dal catodo normalmente alla sua superficie: tali raggi sono dotati della proprietà di riscaldare i corpi che incontrano nella loro propagazione, di renderli spesso luminosi eccitandone la fosforescenza; e i solidi ch'essi colpiscono (vetro o metalli) danno luogo a nuovi raggi di altra natura che sono i famosi raggi di Röntgen; e infine rendono conduttore il gas che attraversano.

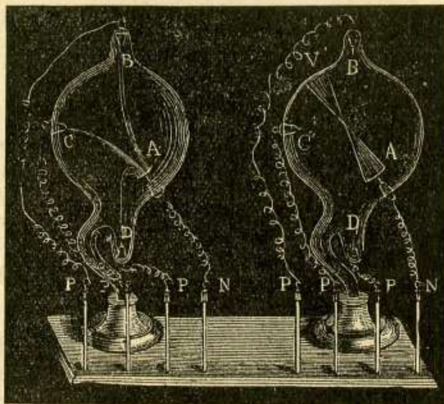


Fig. 489.

Riassumendo, ne' tubi a vuoto, a seconda del grado di rarefazione, si osservano due stadii ben distinti della scarica elettrica: la luce positiva prevale per rarefazioni moderate, sino ad un certo limite che sembra coincidere con la conduttività

massima dell'aeriforme; poi, fino alle rarefazioni estreme, è la luce negativa che prende il sopravvento, sotto la forma di raggi catodici.

Queste due forme di scarica differiscono in più punti: la luce positiva va a cercare l'elettrodo negativo, seguendo tutte le sinuosità del tubo, come accade ne' tubi di Geissler (fig. 380); la luce negativa, sotto la forma di raggi catodici, prevalente ne' tubi di Crookes o di Hittorf nei quali la pressione è ridotta a pochi milionesimi di atmosfera, va invece diritta normalmente al catodo da cui parte, senza che abbia influenza alcuna il posto dell'anodo, e dove colpisce il vetro vi desta la fluorescenza.

Tali particolarità si rendono evidenti coi tubi della fig. 489: due globi di vetro hanno ciascuno tre elettrodi filiformi B, C, D che comunicano col polo positivo, ed uno concavo A che comunica con il polo negativo. Nel primo globo la pressione residua supera i 2^{mm} di mercurio, e compariscono tre archi luminosi che vanno dagli elettrodi positivi a quello negativo; nel secondo la pressione è inferiore a un milionesimo di atmosfera, e dal catodo partono delle radiazioni che, dopo essersi incrociate, vanno diritte sulla parete di fronte eccitandovi la fluorescenza.

I raggi catodici esercitano una cospicua azione luminescente sui corpi che ne sono colpiti. Se è il vetro, il colore della fluorescenza dipende dalla sua qualità: è verde col vetro d'uranio, azzurro col vetro inglese, verde pomo col vetro di Germania. Le sostanze che possono divenire fosforescenti, quando sono colpite dalla scarica del catodo, brillano d'una insolita e viva luce. Per osservare il fenomeno, si dispongono in fondo ad un palloncino munito di elettrodi come quello della figura 490: il solfuro di calcio emette una luce azzurrognola, il corallo calcinato splende di una luce verde o carnicina, il

rubino brilla di una luce rossa splendidissima, il diamante di luce verde, ecc.

Le radiazioni catodiche incontrando nel loro cammino un ostacolo, ne proiettano l'ombra sulla pa-

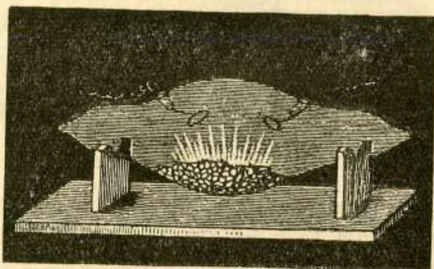


Fig. 490.

rete opposta, come mostra la fig. 491, dove l'ombra della piccola croce di alluminio si disegna in nero

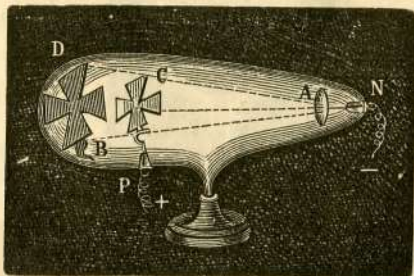


Fig. 491.

sul fondo luminoso del tubo; il che conferma la propagazione rettilinea dei raggi catodici.

La esperienza della fig. 492 sembra dare una prova dell'esistenza materiale di tali radiazioni catodiche:

esse colpendo un piccolo mulinello ad alette di mica, lo fanno correre da un'estremità all'altra del tubo.

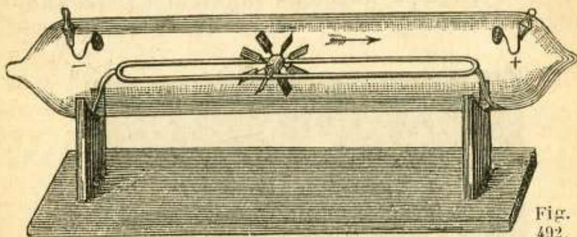


Fig. 492.

Quando i raggi catodici sono concentrati sopra una piccola superficie, questa ne è fortemente scal-



Fig. 493.

data: la laminetta di platino *B* (fig. 493) al centro dello specchio concavo *A* di alluminio comunicante

col polo negativo, mentre *P* funziona da anodo, si arroventa e giunge fino a fondersi. Se si concentrassero i raggi su di un punto della parete di vetro, questo si riscalderebbe sino al punto da fondere.

412. **Deviazione magnetica dei raggi catodici; trasporto di cariche negative.** — L'altro tubo della fig. 494, mentre fa vedere una volta di più la propagazione rettilinea de' raggi catodici, serve a mostrare ed anche a misurare la loro deviazione in un campo magnetico. Questo tubo, dovuto al

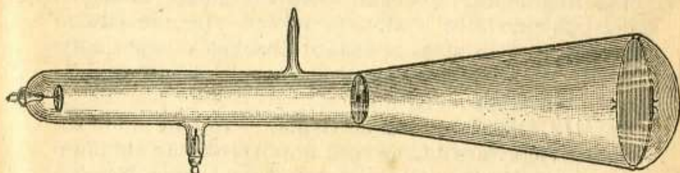


Fig. 494.

Braun, contiene un catodo alla sua estremità sottile, un diaframma forato nel mezzo, ed un disco di mica rivestito di sostanza fosforescente nel fondo della parte larga. Quando viene eccitato, i raggi catodici limitati dal diaframma rendono luminosa una piccola regione circolare del disco, la quale colla sua posizione dimostra che i raggi catodici vanno in linea retta dal catodo allo schermo, attraverso al piccol foro. Ma se si accosta una calamita al tubo dopo il diaframma, la macchia luminosa si sposta sullo schermo: dunque i raggi catodici s'incurvano in un campo magnetico; e da un'accurato studio del fenomeno si è dedotto che essi si comportano come se fossero traiettorie di particelle elettrizzate negativamente, dotate di grandissima velocità.

E aggiungeremo, a tale riguardo, che l'esperienza ha confermato la cosa, dacchè è riuscito al Perrin di raccogliere in un cilindro di Faraday posto nell'interno del tubo, e sottratto a ogni altra influenza perturbatrice, le cariche negative di dette particelle.

Tale è appunto il concetto che dobbiamo farci de' raggi catodici, e tale è nel fondamento quello che ne ebbe il Crookes. Però l'odierno concetto è un po' differente da quello primitivo del Crookes: secondo questi, difatti, le particelle in moto, cariche negativamente, dovevano essere le stesse molecole del gas rarefatto contenute nel tubo; oggi si ritieno invece — e lo stesso pensa il Crookes — che quelle particelle altro non siano che specie di atomi elettrici, ossia gli elettroni.

413. **Dissociazione elettrica.** — È bene a questo punto ricordare le cose più importanti che abbiamo detto trattando della dissociazione elettrolitica e degli elettroni (§ 355).

Abbiamo veduto che il fenomeno dell'elettrolisi si attribuisce ai ioni preesistenti nell'elettrolito, messi in moto, in due opposti versi, dalle forze elettriche provenienti dagli elettrodi. Inoltre, per soddisfare alle leggi dell'elettrolisi (§§ 349, 350), bisogna ammettere non solo che sieno eguali in valore assoluto le cariche dei due ioni formanti una data molecola, ma siano eguali quelle di tutti i ioni che posseggono la stessa valenza chimica; e di più che un ione bivalente possieda una carica doppia di quella di un ione monovalente, ecc. I ioni poi provengono dalla dissociazione di alcune molecole, ossia dalla loro scissione in un atomo o gruppo d'atomi elettrizzato negativamente, e in un atomo o gruppo di atomi elettrizzato positivamente; quelli positivi si muovono verso il catodo, e quelli negativi verso

l'anodo. Giunti agli elettrodi, cedono a questi le loro cariche elettriche, cessando di esser ioni per divenire atomi o gruppi d'atomi ordinari.

Ora, secondo le moderne vedute, si ammette che le piccole cariche cedute dai ioni conservino la loro individualità, anche quando sono entrate nel circuito metallico. Le cariche elettriche che unite agli atomi formavano i ioni, una volta isolate non sono che gli elettroni; e la corrente elettrica entro i metalli, secondo questo modo di vedere, è dovuta al moto degli elettroni stessi attraverso gli spazi interatomici. Cosicchè, stando a questa teoria, l'elettricità non consiste in un fluido continuo *sui generis*, ma invece essa è costituita da innumerevoli piccole porzioni tutte eguali, specie di *atomi elettrici*, detti *elettroni*.

Per spiegare i fenomeni dell'elettrolisi, basta dunque ammettere la *dissociazione elettrolitica*, ma tale ipotesi non basta a spiegare la propagazione dell'elettricità nei gas. Invece si dà ragione tanto del primo quanto del secondo fenomeno e di molti altri, ammettendo la *ionizzazione* o *dissociazione elettrica*, la separazione cioè degli elettroni negativi dagli atomi neutri. Perchè un elettrone negativo possa separarsi da un atomo neutro, occorre una spesa di energia per vincere l'attrazione tra l'elettrone e il ione positivo, che è ciò che resta dell'atomo quando gli si è tolto l'elettrone negativo. Tale spesa di energia è naturalmente diversa a seconda della natura chimica degli atomi: essa è minima per i corpi detti elettropositivi come i metalli, e gradatamente maggiore per quelli più elettronegativi: è estremamente piccola per i corpi in soluzione acquosa.

Ciò posto, la dissociazione elettrolitica, ossia la separazione di una molecola in due ioni, per esempio

quella del cloruro di sodio in un ione positivo di sodio e in un ione negativo di cloro, deve considerarsi come conseguenza della dissociazione elettrica dell'atomo metallico: questo cioè si scinde in un ione positivo di sodio, e in un elettrone negativo, il quale unendosi all'atomo di cloro trasforma questo in ione negativo.

414 **Deviazione elettrostatica de' raggi catodici.** — Tornando ora ai raggi catodici, aggiungeremo che essi sono deviati non solo in un campo magnetico, ma ancora in un campo elettrostatico. Un tubo di Crookes (fig. 495) ha un catodo *C* e un anodo

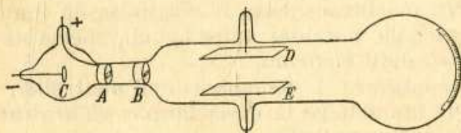


Fig. 495.

A anulare, il quale presenta una piccola apertura rettangolare ed è messo in comunicazione con la terra. Un secondo schermo metallico *B* con un'altra fenditura eguale alla prima, concorre a limitare un sottile pennello di raggi catodici. Al di là sono due piatti metallici *D* ed *E*, tra i quali si stabilisce una differenza di potenziale di 200 o 300 volta, riunendoli separatamente ai due poli isolati di una pila; il fascio de' raggi catodici è allora deviato verso il piatto positivo, come si può constatare mercè lo spostamento della macchia di fluorescenza nella parte posteriore del tubo. Questo deve essere molto vuoto, giacchè, in caso diverso, la ionizzazione del gas tenderebbe ad annullare il campo elettrostatico, ossia la differenza di potenziale tra i due piatti.

415. **Velocità de' raggi catodici; rapporto $\frac{e}{m}$ fra la carica e la massa degli elettroni.** — Fu appunto osservando la deviazione del fascio catodico in un campo magnetico e in un campo elettrico, che si potè misurare, con calcoli che qui non possiamo riferire, la velocità de' raggi catodici ne' tubi vuoti, e il rapporto $\frac{e}{m}$ tra la carica e la massa degli elettroni. Da tali sperimenti è risultato che il valore della velocità oscilla da $2{,}2 \times 10^9$ a $3{,}6 \times 10^9$ cent. al secondo, ossia una velocità che è circa $\frac{1}{10}$ di quella della luce: quanto poi al rapporto $\frac{e}{m}$ si è trovato che esso pe' raggi catodici è costante ed indipendente dalla natura del gas residuo contenuto nel tubo di Crookes, come pure la natura degli elettrodi non esercita alcuna influenza sui detti valori. Il suo valore più approssimato sembra essere $563{,}4 \times 10^{15}$ unità elettrostatiche (C. G. S.).

Ora per l'analogo rapporto $\frac{e}{m}$ del ione di idrogeno nell'elettrolisi, si trova il valore $0{,}289 \times 10^{15}$ unità assolute elettrostatiche, come è facile dedurre ricordando che un equivalente grammo trasporta seco 96538 coulomb: per ciascuna particella costituente i raggi catodici, il detto rapporto risulta dunque circa 1950 volte maggiore di quello spettante al ione d'idrogeno nell'elettrolisi, e quindi molto maggiore di quello relativo ai ioni degli altri corpi.

Per spiegare questo risultato, si può supporre, o che le particelle in moto siano molecole o atomi elettrizzati, ed allora bisogna ammettere che la carica di ciascuna sia molto maggiore di quella de' ioni elettrolitici; ovvero, ciò che è molto più pro-

babile, che le cariche siano le stesse in quei due diversi fenomeni, e allora necessariamente la massa di ciascuna particella è circa 1950 volte minore dell'atomo di idrogeno, e siamo in presenza degli elettroni.

La teoria degli elettroni spiega perfettamente che i raggi catodici hanno identiche proprietà, qualunque sia il gas rarefatto in cui si producono e il metallo che forma il catodo; che essi trasportano veramente delle cariche negative; che la loro velocità, pure essendo grandissima, è minore di quella della luce; che le supposte particelle in moto posseggono una massa reale o apparente che sia; che per il quoziente fra la carica elettrica e la massa delle particelle si è trovato sempre sensibilmente lo stesso valore.

Questi fenomeni fanno penetrare il nostro sguardo nell'interno dell'atomo materiale, il quale oggi non è più considerato come un'entità indivisibile, ma invece quale un sistema assai complesso di elettroni: propriamente un atomo *neutro* si concepisce come un sistema formato da più elettroni moventisi con grandissima rapidità entro una sfera avente una carica elettrica positiva, eguale e contraria alla somma delle cariche degli elettroni (lord Kelvin).

Ordinariamente gli elettroni sono trattenuti nelle loro orbite dalle azioni elettriche; ma può avvenire anche per certe sostanze che gli atomi si sfascino gradatamente perdendo uno o più elettroni. Sono queste le sostanze radioattive: uranio, torio, polonio, radio, atinio ecc., delle quali parleremo in appresso.

Abbiamo voluto dare un cenno di questa moderna teoria la quale promette di rischiarare di viva luce, molti misteri della Natura; ed ora sarà bene che riprendiamo lo studio delle radiazioni.

416. **Raggi di Lenard.** — Hertz scoprì che le radiazioni catodiche si distinguono essenzialmente dalla luce, per la loro proprietà di potere attraversare, a differenza di questa, i metalli; mentre, al contrario, i corpi trasparenti per la luce, oppongono una resistenza assoluta al passaggio dei raggi catodici.

Lenard mise a profitto questa circostanza per studiare le proprietà de' raggi catodici nell'aria libera, costruendo un tubo di Crookes con la regione anticatodica formata da una finestrella chiusa da una sottile lamina di alluminio, in modo però che potesse tenere il vuoto (fig. 496). Sono detti *raggi Lenard* i raggi catodici propagantisi nell'aria dopo di aver attraversato la laminetta di alluminio. Lo stesso fisico trovò che tali raggi si propagano in linea retta come nell'interno del tubo, ma si estinguono rapidamente, perchè l'aria è per essi un

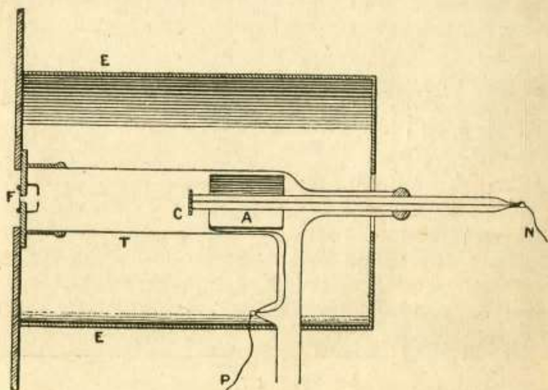


Fig. 496.

mezzo torbido, tanto che non si può constatarne la presenza che ad una brevissima distanza dalla finestrella suddetta. Essi eccitano la fluorescenza di molte sostanze, impressionano le lastre fotografiche, scaricano rapidamente i corpi elettrizzati. Facendo seguire alla finestra *F* un tubo nel quale si

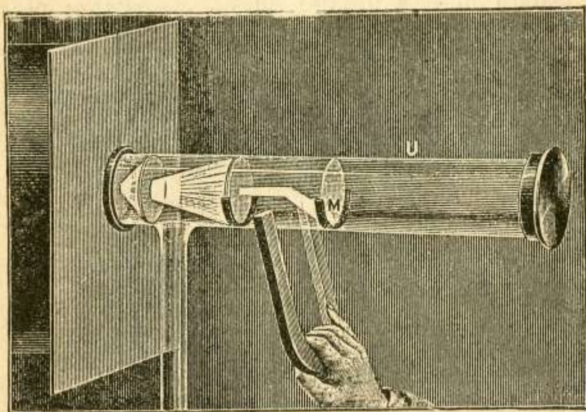


Fig. 497.

possa spingere molto innanzi la rarefazione, i raggi si propagano senza subire una notevole diminuzione d'intensità, e si può allora studiare il loro comportamento rispetto a una calamita, come mostra la fig. 497.

417. **Raggi di Röntgen.** — Tali erano le cognizioni sull'argomento, quando verso la fine dell'anno 1896 il prof. Röntgen scoprì una nuova specie di raggi emessi dal tubo di Crookes, i quali da lui furono detti raggi X, ed oggi sono chiamati anche

raggi Röntgen. Il punto principale di emissione è la regione anticatodica, dove la parete del vetro colpita

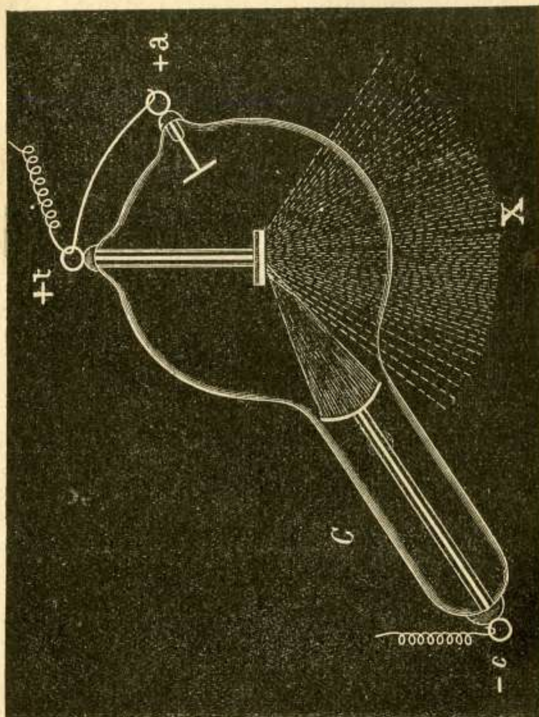


Fig. 498.

dai raggi catodici mostra la più viva fluorescenza giallo-verdastra; per una copiosa emissione loro occorre però che il tubo di Crookes sia eccitato da

un buon rocchetto di Ruhmkorff, o da una grande macchina a induzione. E siccome è facile che la parete del tubo colpita dai raggi catodici si rammollisca pel calore che si produce, si usano oggi i così detti *tubi focus*, nei quali l'anticatodo non è più la parete del tubo, ma un dischetto di platino posto nel centro del tubo (fig. 498).

I raggi Röntgen sono invisibili come i raggi Lenard, ma a differenza di questi non vengono sensibilmente assorbiti dal mezzo ambiente, cosicchè nella loro propagazione seguono la legge dell'inversa del quadrato della distanza. Non sono deviati da calamite, non si rifrangono, nè si riflettono regolarmente: come i raggi catodici da cui provengono, come i raggi di Lenard e quelli ultravioletti, eccitano la fosforescenza e la fluorescenza di molte sostanze, impressionano le lastre sensibili, scaricano i corpi elettrizzati; ma nel mentre i raggi ultravioletti scaricano solo i corpi elettrizzati negativamente su cui cadono, i raggi Röntgen operano indifferentemente la dispersione delle cariche positive e negative, il loro effetto essendo quello di ionizzare l'aria che essi attraversano, cosicchè essa acquista una specie di conduttività elettrica (§ 328).

La proprietà loro di attraversare facilmente corpi opachi per la luce, come la carta, il legno, l'alluminio, le carni, ecc. (le ossa invece sono assai meno trasparenti), e l'altra di impressionare le lastre fotografiche, sono state utilizzate per ottenere l'impressione dello scheletro degli animali, o di qualche parte del nostro corpo. A tale uopo si chiude in una scatola di legno o di cartone una lastra fotografica, con lo strato sensibile rivolto verso l'alto; sul coperchio si dispone, per esempio, la mano, trovandosi il tutto dinanzi e a poca distanza (25^{cm} circa)

dall'anticatodo del tubo di Crookes eccitato (fig. 499). I raggi di Röntgen impressionano fortemente la lastra nelle regioni corrispondenti alle carni e ai tendini, e la lasciano intatta, o quasi, in quelle corri-

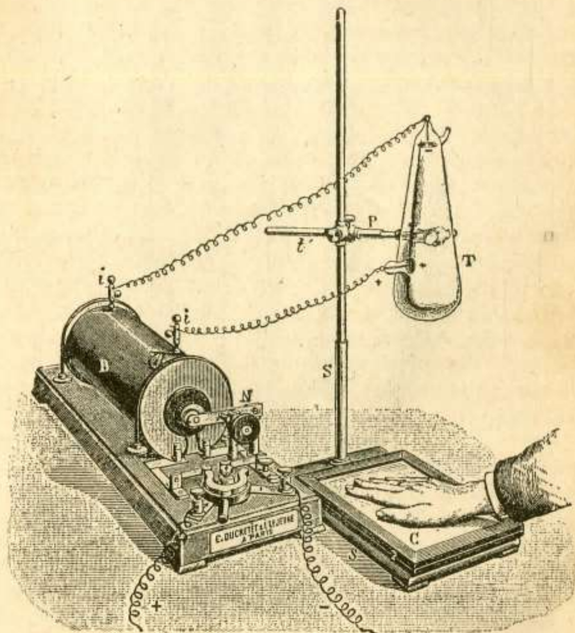


Fig. 499.

spondenti alle ossa. Lo sviluppo dell'impressione, e ogni altra operazione, si fanno poi come nell'ordinaria fotografia. Con un buon tubo focus e un potente rocchetto, basta qualche secondo per ottenere una radiografia come quella della fig. 500.



Fig. 500.

418. **Raggi Bequerel; corpi radioattivi.** — Gli studi sui raggi X condussero il Becquerel alla scoperta che l'uranio e i suoi composti emettono raggi invisibili, capaci anch'essi, come i raggi X, di at-

traversare un gran numero di sostanze opache per la luce (carta nera, legno, alluminio, ecc.), di impressionare le lastre fotografiche, di scaricare i corpi elettrizzati, ecc. Tale singolare proprietà dell'uranio e de' suoi composti non è legata all'altra loro proprietà di essere fosforescenti; perchè la fosforescenza dura in essi un tempo brevissimo, appena un centesimo di secondo; mentre gli effetti suddetti perdurano indefinitamente, anche nell'oscurità.

Questa proprietà dell'uranio di emettere raggi invisibili atti a produrre gli effetti in discorso, è di un grande interesse scientifico, ed attrasse subito l'attenzione de' fisici. Così avvenne che, in seguito a lunghe e pazienti ricerche, altri scienziati, e segnatamente i coniugi Curie, poterono scoprire una proprietà analoga con effetti di gran lunga più intensi, prima nel torio, e poi in altri corpi che fino allora non erano conosciuti, come il polonio, il radio, l'attinio. Il radio specialmente, scoperto dalla sig.ª Curie, ha il potere di emettere le dette radiazioni in un grado elevatissimo, anche a bassissime temperature.

Il radio non si è potuto isolare che ultimamente; ma sino dal principio se ne sono preparati cloruri e bromuri, e sono questi sali più o meno puri che si adoperano nelle esperienze. Il peso atomico del radio, secondo la sig.ª Curie, è 226. Il Demarçay ne studiò lo spettro caratteristico, e anche con tal mezzo venne confermata l'esistenza di questo nuovo corpo semplice.

Il radio accompagna il bario nelle pechblende (ossido di uranio), nelle quali è contenuto in tenuissima quantità: *relativamente* ricche sono le pechblende che provengono dalle miniere di Joachimsthal in Boemia. Tuttavia, da parecchie tonnellate di questo minerale si ricavano appena pochi

decigrammi di cloruro o bromuro di radio puro, onde il prezzo elevatissimo di tale sostanza.

419. **Effetti dovuti alle radiazioni del radio.** — In presenza del radio, i corpi fosforescenti e fluorescenti divengono luminosi. Uno schermo di cartone spalmato di platino-cianuro di bario, quello stesso che si usa per l'osservazione fluoroscopica con i raggi X, è un mezzo molto adatto alla dimostrazione del fenomeno. Se, difatti, si accosta allo schermo un po' di radio, che ordinariamente è contenuto in una scatoletta chiusa da una lastrina di mica, appare un leggiero splendore che si sposta movendo la sostanza radioattiva.

A tal fine Crookes ha ideato un piccolo apparecchio detto *spintariscopio:* consiste esso in un tubetto, nel fondo del quale si trova una particella di radio a brevissima distanza da uno schermo di solfuro di zinco, sostanza sensibilissima a questi raggi. Una lente che funziona da microscopio semplice, aiuta ad osservare la luminosità dello schermo: si vede un gran numero di punti lucenti, uno scintillio rassomigliante a un fuoco d'artifizio: esso è prodotto dal *bombardamento* continuo della sostanza attiva.

Interponendo fra il radio e uno schermo fluorescente un corpo qualunque, vi appare un'ombra di tal forma, da rendere manifesto che la fosforescenza è prodotta da raggi rettilinei emessi dal radio.

Un effetto permanente si ottiene sostituendo allo schermo fluorescente una lastra fotografica: certi corpi sono più permeabili, altri meno ai raggi del radio; la lastra è quindi impressionata in certe parti e protetta in altre, e si ottengono radiografie simili a quelle prodotte dai raggi X.

Bisogna però notare che, volendo ottenere la radiografia di una mano, se la massa del radio sup-

posta non estremamente tenue, fosse tenuta presso la cute, questa ne risentirebbe non lieve danno. In tali condizioni possono difatti prodursi prima degli arrossamenti della pelle, poi vere lesioni.

In compenso pare che il radio riesca ad alleviare, se non a guarire, certe malattie, come il cancro; e pare omai cosa certa che le radiazioni in discorso distruggano, o, per lo meno, arrestino lo sviluppo di alcuni microbi. È poi provato che il radio esercita un'azione energica sui centri nervosi, cosicchè sarebbe pericolosa la vicinanza di una notevole quantità di tale sostanza.

Un' azione distruttrice è spiegata dai raggi del radio anche su altri corpi, come alcuni tessuti, fibre vegetali, ecc. In vari casi essi producono modificazioni chimiche più o meno profonde, trasformando l'ossigeno in ozono, il fosforo bianco in fosforo rosso, ecc.

Un altro effetto cospicuo è lo sviluppo continuo di calore che ha luogo nel radio; si può ritenere che un grammo di radio generi all'incirca 110 piccole calorie all'ora. Secondo gli studi del prof. Dewar, sembra che, malgrado grandi variazioni di temperatura, lo sviluppo di calore resti invariato: sottoposto il radio alla temperatura dell'aria liquida, l'emissione di calore seguita come alla temperatura ordinaria.

Tuttavia il fenomeno che, come la produzione continua del calore, desta maggior interesse nello studio di questo corpo, è il suo grande potere ionizzatore, per mezzo del quale più specialmente si misura il grado di *radioattività:* una minima massa di radio puro scarica immediatamente un elettroscopio elettrizzato. D'accordo poi con la radioattività, a seconda della maggiore o minore purezza, variano tutte le altre proprietà suddette. Come nel

caso analogo dei raggi catodici e dei raggi X, la formazione di ioni nell'aria è dovuta all'urto prodotto dai raggi sugli atomi gasosi: i ioni poi dello stesso segno sono respinti dal corpo elettrizzato, quelli di segno contrario sono invece attratti, e neutralizzano la carica del corpo elettrizzato,

420. **Raggi α, β, γ. Azione magnetica ed elettrica sull'irraggiamento.** — L'irraggiamento dei corpi radioattivi è di natura complessa: oltre alla luce ed al calore essi emettono altri raggi, sui quali vogliamo ora fermare la nostra attenzione.

Le radiazioni conosciute sono di due specie: o son dovute a movimenti che si propagano nell'etere come la luce ed i raggi Röntgen, o sono costituite dal moto di particelle elettrizzate, come, per esempio, i raggi catodici. Importa quindi indagare anzi tutto se le radiazioni emesse dai corpi radioattivi rientrino fra queste ultime: l'indagine è relativamente facile, perchè le particelle elettrizzate in movimento sono deviate da forze magnetiche ed elettriche, mentre invece le radiazioni dovute a movimenti dell'etere non sono influenzate nella loro propagazione dalle forze suddette. Inoltre il modo di comportarsi dell'irraggiamento delle sostanze radioattive in un campo magnetico od elettrico, sarà un criterio sicuro per distinguere le varie specie di radiazioni onde è costituito.

Premesso ciò, si ponga entro una cavità cilindrica, piuttosto profonda, praticata in un blocco di piombo una piccola quantità di sale di radio; in queste condizioni dall'apertura della cavità viene emesso un sottil fascio di raggi. Perpendicolarmente al fascio, si faccia agire un intenso campo magnetico disponendo le cose come indica la fig. 501.

Mediante i diversi rivelatori, si può allora constatare che il fascio non è rimasto unito, ma si è

diviso in tre parti, delle quali una ha mantenuto la direzione primitiva, e le altre due sono state deviate in sensi opposti in un piano perpendicolare alle linee di forza del campo magnetico. La prima parte dunque si comporta nel campo magnetico come i raggi Röntgen; le altre due si comportano come i raggi catodici e i raggi positivi, talchè si è indotti a ritenerle costituite dalla proiezione di par-

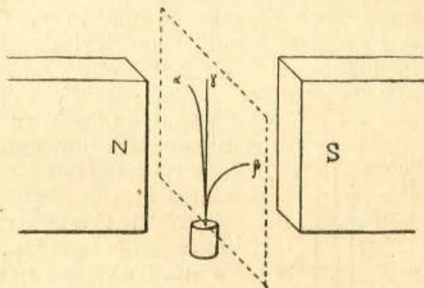


Fig. 501.

ticelle elettrizzate negativamente per l'una e positivamente per l'altra.

Ai raggi dovuti a una proiezione di particelle positive si è dato il nome di raggi α; a quelli composti di particelle negative, il nome di raggi β; la specie non deviata è detta raggi γ. Un carattere che distingue le tre specie di raggi ora detti, è il loro diverso potere penetrante. — I raggi α sono assorbiti assai facilmente, e sono arrestati da un foglio di carta, da pochi centimetri di aria. — I raggi β hanno invece una penetrazione assai grande, ed arrivano ad attraversare anche spessori notevoli di metallo. — I raggi γ infine sono penetrantissimi e riescono a superare strati di piombo di

qualche centimetro. Di tale proprietà si fa uso per separare i raggi γ dagli altri, e per osservare la loro azione; si trova così che la radiazione γ è piccola rispetto a quella degli altri due tipi di radiazioni.

A confermare la natura delle radiazioni emesse dalle sostanze radioattive come risulta dal loro comportamento nel campo magnetico, conviene assoggettarle all'azione del campo elettrico per vedere se i raggi γ restino anche in questo caso indeviati, e se i raggi α, β, subiscano deviazioni in accordo con quelle osservate nel campo magnetico. All'uopo si fa passare il fascio parallelo di raggi provenienti da un preparato di radio fra due piatti metallici elettrizzati di segno contrario (fig. 502); e col mezzo di rivelatori sufficientemente sensibili, si trova difatti che una parte dell'irraggiamento viene deviata verso il piatto negativo, un'altra viene deviata verso quello negativo, ed una parte resta invariata. La prima è dunque composta di raggi α; la seconda è costituita da particelle negative, sono cioè i raggi β; i raggi γ poi molto verosimilmente non consistono di particelle elettrizzate.

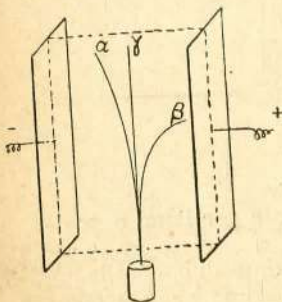


Fig. 502.

Con procedimenti analoghi a quelli detti pei raggi catodici si son potuti misurare la velocità e il rapporto $\frac{e}{m}$ fra la carica e la massa delle particelle α e β. Pei raggi α si è trovata una velocità compresa

fra 10^9 e 2×10^9 cm. al secondo, e il rapporto $\frac{e}{m} =$ $= 5,1 \times 10^3$ unità elettromagnetiche assolute (C. G. S.). Questo valore è dello stesso ordine di grandezza di quelli spettanti ai ioni elettrolitici e gassosi, e propriamente è la metà circa del valore analogo che compete all'idrogeno. Da misure poi e considerazioni nelle quali non possiamo entrare, sembra che la carica e portata da una particella α sia, in valore assoluto, di due elettroni, cosicchè dal suddetto valore del rapporto $\frac{e}{m}$ si deduce che la massa m di una particella α è circa 4 volte maggiore di quella dell'atomo d'idrogeno; si tratterebbe cioè di atomi di elio elettrizzati positivamente, e ciascuno porterebbe la carica equivalente a due elettroni. In appoggio di questa conclusione sta il fatto, che i minerali radioattivi contengono sempre dell'elio occluso nella massa.

Ammesso ciò, è facile calcolare l'energia cinetica posseduta da una particella α: essa è

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{e} v^2 e = 6 \times 10^{-6} \text{ erg},$$

la quale, rispetto alla massa della particella, è grandissima. Da qui sorge spontanea l'idea che il calore svolto dai sali di radio sia, almeno in parte, dovuto alla trasformazione di energia che accompagna l'assorbimento dei corpuscoli α per parte della massa stessa della sostanza attiva e dei corpi che la circondano.

Ai raggi α è dovuto il fenomeno più bello e caratteristico che si possa osservare con le sostanze radioattive, vale a dire lo scintillio del solfuro di zinco o blenda esagonale di Sidot: lo spintariscopio

del Crookes sopra descritto ha servito a rendere popolare l'esperienza. Che lo scintillio in tale apparecchio sia dovuto ai raggi α, si prova facilmente interponendo un foglio di carta tra la particella di radio e lo schermo, poichè si vede cessar subito ogni effetto.

Raggi β. — Questi raggi vengono deviati da un campo magnetico, anche debole, nello stesso senso dei raggi catodici, vale a dire nella direzione in

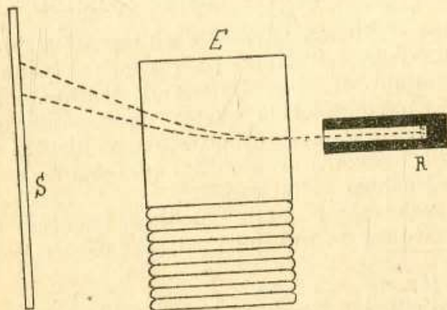


Fig. 503.

cui verrebbe deviato un flusso di cariche negative uscenti dalla sostanza radioattiva. In ordine cronologico, essi furono scoperti per i primi dal Becquerel nell'uranio e nei suoi composti, prima ancora che si sospettasse l'esistenza dei raggi α.

È facile verificare la deviazione magnetica dei raggi β: all'uopo si può disporre la esperienza come indica la fig. 503. *R* è un tubetto di piombo in fondo al quale è posto un sale di radio, le cui radiazioni α sono eliminate mediante una sottile

lamina di alluminio; E è un'elettrocalamita, ed S è uno schermo ricoperto di platino-cianuro di bario. Stando al buio si vedrà, fintantochè l'elettrocalamita non funziona, che i raggi β producono una piccola macchia luminosa a contorni ben delineati e in direzione dell'asse del tubo di piombo R. Quando poi si fa agire l'elettromagnete, si vedrà la macchia luminosa spostarsi in alto o in basso, a seconda del senso delle linee di forza del campo, e allungarsi in una striscia sfumata normalmente alle linee di forza magnetica.

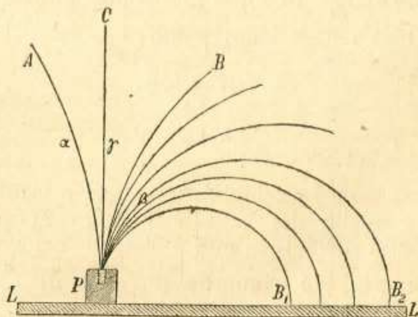


Fig. 504.

In questa esperienza l'effetto prodotto dai raggi γ è in generale assai debole; ma se invece dello schermo fluorescente si adopera una lastra fotografica, si ottiene un'imagine del fascio β deviato, e un'altra del fascio γ che non subisce alcuna deviazione.

Il fatto che la striscia luminosa prodotta sullo schermo dal fascio β deviato è più estesa e meno intensa di quella prodotta dal medesimo fascio non

deviato, prova che i raggi β sono deviati in diversa misura dal campo magnetico. Tale fenomeno si può designare col nome di *dispersione magnetica* dei raggi β: la fig. 504, dove il campo si suppone diretto normalmente al foglio, mostra l'andamento della deviazione. Si vede che i raggi γ non sono deviati; che la deviazione dei raggi β non è la stessa, e avviene dalla parte opposta a quella dei raggi α.

Osservando poi, oltre la deviazione magnetica di codesti raggi β anche quella elettrica, si è potuto calcolare anche per questi raggi la velocità e il valore del rapporto $\frac{e}{m}$. In unità elettromagnetiche assolute C. G. S. i detti valori sono:

$$v = 2{,}37 \times 10^{10}.$$

$$\frac{e}{m} = 1{,}321 \times 10^{7}.$$

Come si vede la velocità dei raggi β risulta superiore a quella dei raggi catodici, e si avvicina alla velocità della luce che è 3×10^{10} cm.

Per quanto poi riguarda il valore di $\frac{e}{m}$, interessa grandemente notare che esso è dello stesso ordine di quelli trovati da varii sperimentatori per i raggi catodici osservati tanto nell'interno dei tubi a vuoto, quanto all'esterno (raggi di Lenard). La massa delle particelle β è dunque $\frac{1}{2000}$ circa — in numeri rotondi — di quella dell'atomo di idrogeno, e la carica portata da esse è sempre quella di un elettrone. I raggi β sono pertanto dei veri raggi catodici propagantisi nell'aria.

È interessante il fatto che il fascio dei raggi β non è omogeneo: stando alle misure del Kaufmann,

si ha pei raggi β meno veloci $v = 2,36 \times 10^{10}$ cm. al secondo, e il valore corrispondente di $\frac{e}{m} = 1,31 \times 10^7$ *u. e. m.*; mentre per quelli più veloci, $v = 2,72 \times 10^{10}$ cm. al secondo, ed $\frac{e}{m} = 0,77 \times 10^7$ *u. e. m.*

Naturalmente la velocità degli elettroni, e quindi dei raggi catodici che ne sono le traiettorie, è diversa a seconda del modo di loro produzione, del grado di rarefazione del mezzo in cui si muovono, della forza elettrica che li sollecita; e si hanno perciò, in corrispondenza alle diverse velocità, raggi catodici più o meno penetranti. Così la detta velocità ne' tubi di Crookes è tanto maggiore quanto essi sono più duri, ossia più vuoti; i raggi β poi del radio che sono raggi catodici nell'aria ordinaria, hanno velocità grandissime, superiori a quella dei raggi catodici ne' tubi di Crookes molto vuotati.

Quanto al rapporto $\frac{e}{m}$ della carica elettrica alla massa degli elettroni, le varie esperienze danno per esso valori poco diversi, finchè si tratta di raggi catodici relativamente di moderata velocità. E se si tien conto della grande varietà di fenomeni nei quali si manifestano gli elettroni negativi, e della diversità dei metodi usati nella misura del rapporto fra la loro carica e la massa, l'accordo fra i risultati è più che soddisfacente. Bisogna quindi concludere che la particella catodica e la particelle β sono una stessa entità.

Ma quando la velocità degli elettroni si accosta a quella della luce, come avviene di alcuni raggi β del radio, secondo i risultati ottenuti dal Kaufmann sopra riferiti, il detto rapporto si riduce circa alla metà. E poichè tutto fà credere che la carica

elettrica sia la stessa per tutti gli elettroni, bisognerà concludere che la loro massa non rimanga costante, ma cresca con la velocità quando questa si avvicina alla velocità della luce. Ciò conferma che la massa degli elettroni è di natura elettromagnetica, ch'essa cioè consiste in una specie di inerzia dovuta alla loro natura di cariche elettriche in movimento (§ 415).

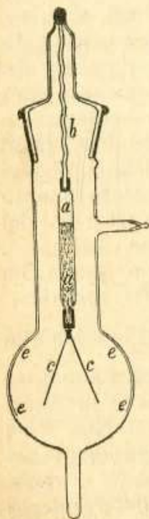


Fig. 505.

A cagione della diversa velocità dei raggi α e β, e del diverso loro grado di penetrazione, se si chiude un sale di radio in un'ampolla di vetro, mentre i raggi β attraversano la parete, gli α sono trattenuti ed elettrizzano il vetro positivamente. Si deve allo Strutt un grazioso apparecchio che serve a provare la detta elettrizzazione. Entro un recipiente di vetro (fig. 505) in cui venne fatto un buon vuoto, trovasi un tubetto chiuso *a* contenente un po' di radio: questo tubetto sostenuto da un isolatore di quarzo fuso *b*, ha la superficie coperta da uno strato conduttore, e regge due foglie d'oro *cc* formanti un elettroscopio. Queste foglie sono in continuo moto: esse, a poco a poco si aprono, sinchè toccano le striscie di stagnola *e e* applicate alle pareti e comunicanti col suolo; allora ricadono per allontanarsi di nuovo, e così di seguito. L'effetto è dovuto, come si è detto, alla carica positiva dei raggi α assorbiti dal tubetto, mentre la carica negativa è trasportata via dai raggi β. È necessario fare il vuoto nel recipiente, altrimenti la carica del

tubetto *a* si disperderebbe a causa della conducibilità del gas ionizzato.

Raggi γ. — Consideriamo ora la terza specie di raggi emessi dai corpi attivi designata col nome di raggi γ: essi vennerõ scoperti per ultimi dal Villard (an. 1900).

Abbiam detto che questi raggi sono caratterizzati dal loro grandissimo potere penetrante, e dal fatto che non sono punto influenzati nè dal campo magnetico nè da quello elettrico.

Gli effetti elettrici, fotografici e luminosi dei raggi γ sono minori di quelli prodotti dai raggi α e β: tuttavia essi si osservano abbastanza bene con i sali di radio, meno assai con quelli di torio ed uranio. Le loro proprietà li fanno grandemente rassomigliare ai raggi di Röntgen prodotti con tubi di Crookes molto duri, aventi un potere penetrante maggiore dei raggi forniti da tubi meno vuoti. Ricordiamo che i raggi Röntgen hanno la loro origine nell'anticatodo, nella parte cioè colpita dai raggi catodici; similmente è logico ammettere che i raggi γ siano prodotti dall'urto dei raggi β contro le particelle della medesima sostanza radioattiva. Uno dei fatti che avvalorano questa ipotesi sta in ciò, che non si conosce esempio di corpo radioattivo nel quale la emissione dei raggi β non sia accompagnata da quella dei raggi γ, mentre vi sono corpi radioattivi, come il polonio, che emettono soltanto raggi α.

421. **Radioattività indotta: emanazione.** — Un'altra proprietà assai importante dei corpi radioattivi è quella di eccitare la radioattività (*radioattività indotta*) in corpi vicini, i quali diventano radioattivi alla lor volta. Il fenomeno è prodotto dal torio, dall'attinio, dal radio, e non dall' uranio. La radioattività indotta non è permanente, ma

svanisce dopo un certo tempo: quella dovuta al radio si riduce a metà in 28 minuti circa, quella dovuta al torio si abbassa alla metà in 11 ore. In ogni caso la natura del corpo esposto ha poca influenza sul fenomeno.

L'attività indotta non è dovuta all'azione diretta dei raggi: basta difatti porre il preparato radioattivo in un recipiente di vetro chiuso ermeticamente, anche da una foglia di mica sottilissima, per rendere impossibile qualunque manifestazione di attività indotta su corpi esterni vicini al recipiente. Al contrario, collocando in un recipiente chiuso la sostanza radioattiva e diversi corpi in posizioni differenti, si constata che questi diventano radioattivi, e che l'attività indotta ha la medesima intensità sopra ognuno, qualunque posizione esso abbia occupato; ed anche non importa che sia liberamente esposto al radio oppure protetto dalle radiazioni dirette con schermo di piombo. Il radio e i corpi indotti possono anche essere contenuti in vasi diversi, purchè però cômunicanti tra di loro; ed è molto importante il fatto che un gas qualunque che passa sul radio, rende attivi gli altri corpi con i quali va a contatto. Tutto ciò conduce a ritenere che la radioattività indotta sia dovuta a qualche cosa che si diffonde nell'ambiente e che può essere trasportata da una corrente di gas: e in verità il radio emette, oltre ai raggi suddetti, una sostanza gassosa tenuissima detta *emanazione,* la quale, venendo a contatto coi corpi, comunica loro l'attività.

Questa importante proprietà di produrre costantemente, sebbene in quantità infinitesima, un gas dotato di proprietà fortemente radioattive (emanazione), fu la prima volta scoperta da Rutherford ne' sali di torio: in seguito venne anche constatata dai coniugi Curie e da altri nei sali del radio e

dell'attinio; l'uranio invece non produce emanazione.

La radioattività delle emazioni però ha un carattere temporaneo; accade cioè che, dopo un certo tempo che varia a seconda dell'elemento dal quale proviene, l'emanazione perde completamente la sua proprietà radioattiva.

Nel caso del radio l'emanazione da esso prodotta rimane in gran parte occlusa nella massa del sale, e a grado a grado che va sparendo, altra se ne forma; si raggiungerà, per così dire, l'equilibrio, quando la quantità prodotta equivale a quella che si distrugge. Per rimuovere l'emanazione dal sale, o si può scaldar questo a temperatura elevata, od anche scioglierlo nell'acqua. Ad ogni modo il radio che è stato privato della sua emanazione con l'uno o l'altro modo, non presenta più che i $^3/_4$ circa della sua primiera attività, e non emette allora che raggi α. Ma lasciando a sè il radio e l'emanazione così estratta, si trova che, man mano che l'emanazione isolata perde l'attività, il radio ripristina la sua propria: dopo un mese circa, l'emanazione si è distrutta, mentre il radio si è rifornito della provvista normale di emanazione che può essere nuovamente estratta. Bisogna quindi concludere che il radio produce continuamente emanazione, ossia che gli atomi di radio vanno lentamente trasformandosi in atomi di emanazione.

Per mettere in evidenza l'emanazione del radio, si può far uso dell'apparecchio semplicissimo indicato nella fig. 506. Esso consta di un tubetto d'assaggio *t*, chiuso da un tappo attraverso al quale passano due cannine di vetro: quella *i* termina a imbuto; l'altra, munita di una chiavetta *r*, comunica con un lungo tubo di vetro *T* che ha la parete interna rivestita di un sottile strato di solfuro

di zinco. Si mette in fondo al tubo *t* la quantità di sale di radio di cui si può disporre, e vi si versa sopra dell'acqua per l'imbutino *i* in modo da empire il tubetto. Fatto ciò, si chiude la chiavetta *r*, e si aspetta che la sostanza attiva sia completamente sciolta; riaprendo di poi *r*, si produce una lenta aspirazione in modo da provocare un lieve gorgoglio dell'aria esterna attraverso al tubo *t*.

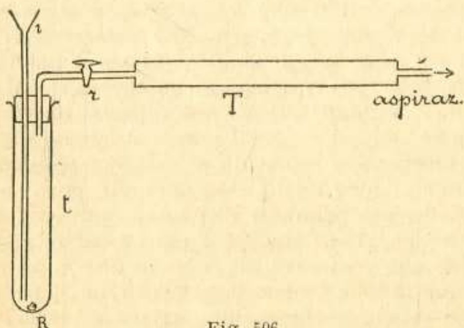


Fig. 506.

Operando in una stanza al buio, si vedrà, appena comincia l'aspirazione, il tubo *T* divenir luminoso dalla parte donde arriva l'aria, e la luminescenza guadagnar terreno lentamente. Ad un dato momento si arresta la corrente d'aria, e si lascia l'apparecchio a sè: si vedrà allora la luminescenza invadere a poco a poco tutto il tubo, e prima crescere d'intensità per alcune ore, e poi decrescere lentamente. — Ripetendo l'esperienza dopo poco tempo, facendo passare cioè nuova aria attraverso alla soluzione di radio, gli effetti di luminescenza saranno assai deboli; ma se si lascia il tubo *t* chiuso

per una ventina di giorni, e dopo questo tempo si ripete l'esperimento descritto, la luminescenza nel tubo *T* sarà ancora ben viva.

Se si raccoglie l'aria proveniente dalla soluzione del sale di radio, non già in un tubo con le pareti coperte di solfuro di zinco, ma in un recipiente munito di elettrodi, si constata una intensa ionizzazione, persistente anch'essa come la luminescenza detta dianzi.

Si deve dunque concludere che i sali di radio (e lo stesso dicasi di quelli di torio) producono un gas dotato temporaneamente di proprietà radioattive: esso rimane in gran parte occluso ne' sali medesimi finchè si trovano allo stato solido, ma viene messo in libertà con la loro soluzione.

La disposizione sperimentale suddetta con il solfuro di zinco può servir bene per mostrare a un uditorio, non solo l'esistenza di questo gas radioattivo, ma ancora alcune delle sue proprietà caratteristiche.

422. **Depositi radioattivi.** — Secondo il Rutherford poi, la radioattività indotta è dovuta ai *depositi temporaneamente radioattivi* nei quali si trasforma la emanazioae. Tali depositi tenuissimi, impercettibili, possono tuttavia essere in parte asportati con lo strofinare i corpi, o con la loro soluzione in acidi, ecc.: ma allora il corpo che ha servito allo sfregamento, o l'acido, ecc. acquistano essi stessi temporaneamente la radioattività.

Aggiungeremo che l'attività indotta si produce anche in un sale inattivo, sciogliendolo in uno stesso liquido con un sale attivo; separando indi i due sali, si trova che il primo ha acquistato una temporanea attività.

Delle successive trasformazioni del radio ci occuperemo in seguito.

123. **Corrente dovuta al moto dei ioni.** — Prima di vedere in che modo si possa misurare la radioattività delle diverse sostanze, ci bisognerà studiare la *corrente dovuta al moto de' ioni.* Supponiamo dell' aria sottoposta all' azione di una sorgente ionizzatrice qualsiasi, compresa fra due piatti conduttori paralleli, mantenuti a potenziali diversi: si avrà una doppia corrente di ioni verso i due piatti, ossia una vera corrente elettrica. L'esperienza prova che questa cresce con la differenza di potenziale de' conduttori, ma non le è proporzionale; anzi la corrente tende verso un massimo detto *corrente di saturazione,* a meno che il campo non diventi esplosivo, ossia che una scarica brusca si faccia tra i due conduttori.

È evidente difatti che le cariche trasportate dai ioni, in ciascun secondo, sono tutto al più eguali alle cariche liberate nello stesso tempo dalla sorgente che produce la ionizzazione; esse anzi raggiungeranno questo limite soltanto se il campo sarà atto a imprimere ai ioni una velocità tale, che essi possano arrivare agli elettrodi prima di riunirsi o diffondersi. Raggiunta la corrente di saturazione, un ulteriore aumento del campo elettrico non può evidentemente produrre nessun aumento di corrente, giacchè tutte le particelle elettrizzate arrivano agli elettrodi prima che esse possano ricombinarsi fra di loro: la curva che dà la corrente in un gas ionizzato ha per tale ragione la forma della fig. 507. Il valore massimo di tale corrente, ossia la corrente di saturazione, rappresenta dunque la carica totale portata dai ioni che la sorgente ionizzatrice produce in un secondo, e perciò ne misura l'attività.

Vedremo subito che per queste misure, anzichè al galvanometro, si ricorre a un elettrometro, deter-

minando il tempo che occorre affinchè il potenziale di un conduttore passi, per effetto delle radiazioni, da un dato valore a uno minore (che può essere anche zero); ovvero anche si misura la variazione di potenziale che si produce in un tempo costante.

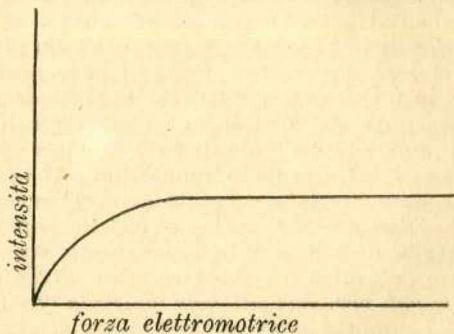


Fig. 507.

424. **Metodi e strumenti per le ricerche della radioattività. Attività d'una sostanza.** — Siamo ora in grado di intendere i metodi e gli strumenti più in uso per lo studio della radioattività.

Un metodo molto semplice per determinare se una sostanza è dotata di proprietà radioattive, consiste nel disporla sopra una lastra fotografica avvolta in carta nera opaca alla luce, in modo che la gelatina sensibile si trovi dalla parte della sostanza stessa. Dopo un certo tempo che varia naturalmente col potere radioattivo della sostanza (qualche ora nel caso dell'uranio), si ottiene sulla lastra una impressione che riproduce presso a poco la forma del materiale attivo. Il metodo fotografico però non può servire che come mezzo di ricerca

qualitativa; esso non ha ormai che un interesse storico.

Di gran lunga preferibile è il metodo elettrico: questo si basa sulla proprietà che hanno i corpi radioattivi di ionizzare l'aria e renderla così più o meno conduttrice; è sensibilissimo e suscettibile di esatte misure.

L'*attività di una sostanza* è proporzionale al numero dei ioni che la sua unità di peso produce nell'aria in un secondo; a tal fine si richiede però che la sostanza sia distesa in uno strato sottilissimo. E poichè la corrente di saturazione è anche essa proporzionale al detto numero di ioni (§ 423), potremo assumere tale corrente come misura dell'attività d'una sostanza, come si è detto sopra: *si converrà cioè di misurare l'attività di una sostanza per mezzo dell'intensità della corrente di saturazione che può produrre nell'aria ionizzata l'unità di peso della sostanza stessa, distesa in uno strato sottilissimo.*

L'attività delle sostanze gassose, le quali di solito sono diffuse nell'aria in quantità così piccole da sfuggire a ogni determinazione di massa, anzichè all'unità di peso, vien riferita all'unità di volume: ossia, *l'attività di una sostanza gassosa è uguale al rapporto dell'intensità della corrente di saturazione al volume del gas attraversato dalla corrente stessa.*

Nella pratica basta spesso fare delle misure di confronto, considerare cioè l'attività di una sostanza rispetto a quella di un'altra che si prende come campione, e alla quale si conviene di attribuire l'attività unitaria. Il confronto si intende fatto a pesi uguali, e d'ordinario si assume come sostanza tipo l'uranio metallico; l'attività allora si dice misurata in *unità uraniche.*

Finalmente, vi sono delle sostanze radioattive solide raccolte in quantità così piccola, che è impossibile ogni misura ponderale o volumetrica. In tal caso non si può più determinare l'attività loro nel modo detto sopra, ma si possono determinare solo le variazioni di attività che la massa ignota subisce col trascorrere del tempo; si paragona cioè l'attività sua dopo un certo tempo a quella che aveva in principio.

In ogni caso le misure si riducono al confronto di correnti di saturazione: i galvanometri però non si prestano, perchè l'intensità di tali correnti è in generale troppo piccola per essere rivelata da essi; la misura si fa invece con gli elettrometri, come si è già detto. Supponiamo due conduttori A e B, dei quali B, per esempio, comunica con la terra, e A è isolato ed inizialmente portato ad un potenziale V. L'intensità della corrente che si stabilisce fra di essi pel moto dei ioni, è data dalla capacità elettrostatica C di A moltiplicata per la variazione di potenziale ΔV da esso subita nell'unità di tempo:

$$(1) \qquad i = C \,.\, \Delta V.$$

Si vede che se la capacità C è abbastanza piccola, la variazione di potenziale ΔV può essere notevole anche se i è piccola. La misura dunque dell'attività di una sostanza si fa misurando la variazione del potenziale che subisce, nell'unità di tempo, un conduttore che riceve la corrente di saturazione nel gas ionizzato. Il conduttore A isolato si chiama il collettore; e poichè esso deve necessariamente essere unito all'elettrometro, la capacità C è quella complessiva del collettore e dell'elettrometro.

La disposizione più semplice, usata spesso per

misurare l'attività di una sostanza, è quella della fig. 508: due piatti metallici A e B sono posti orizzontalmente l'uno sopra l'altro; quello superiore A che funziona da collettore è collegato con un elettroscopio E, il quale serve a misurarne il potenziale; l'altro B è collegato con la gabbia dell'elettroscopio e con la terra. Si distende sul piatto inferiore la sostanza in esame, poi si carica l'elettroscopio e si osserva sulla sua graduazione la velocità con cui le foglie si abbassano.

Se si vuole determinare l'attività di un solido o di un liquido in unità uraniche, basterà osservare

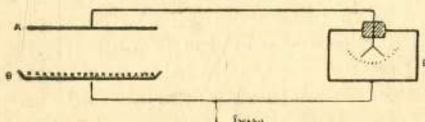


Fig. 508.

il tempo t impiegato dalle foglie a percorrere un certo intervallo della scala dell'istrumento per l'azione di un determinato peso della sostanza, e il tempo t' impiegato dalle foglie a percorrere lo stesso intervallo sotto l'azione di un egual peso di uranio metallico. Il rapporto $\frac{t'}{t}$ è evidentemente uguale al rapporto fra le intensità delle correnti di saturazione, e misura perciò l'attività della sostanza in unità uraniche.

Se si vuole però misurare l'attività assoluta, bisogna determinare il valore della corrente di saturazione fra i due piatti; e all'uopo è necessario che la graduazione dell'elettroscopio sia fatta in volta, e che di più si conosca la capacità in farad del collettore, come richiede l'equazione (1). Queste

due determinazioni per lo stesso apparecchio si fanno una volta per sempre, e costituiscono la sua taratura; le norme da seguire sono quelle che abbiamo dette ai paragrafi 319 e 325. Chiamando C la capacità del collettore, V la variazione di potenziale in un tempo t, p il peso della sostanza, la sua attività è data dalla relazione:

$$a = \frac{C \cdot V}{p \cdot t};$$

e se si tratta di un gas, dicendo v il volume compreso fra A e B, si ha:

$$a = \frac{C \cdot V}{v \cdot t}.$$

Uno di tali apparecchi che permette di fare tutte le ricerche che si presentano nella radioattività, è quello rappresentato in sezione dalla fig. 509: in esso la camera di ionizzazione Z è costituita da un recipiente di metallo m, che si appoggia sul coperchio dell'elettroscopio. In questo recipiente è situato il dispersore k unito all'asta s che regge la foglia a; la carica elettrica del dispersore e dell'elettroscopio si fa col mezzo di una piccola sonda bene isolata, che attraversa il coperchio della camera di ionizzazione. Sul fondo di questa camera può adattarsi un apposito recipiente anulare per sostanze solide o liquide; per due fori poi muniti di chiavetta si possono far circolare i gas radioattivi che si sviluppano dai liquidi. La figura mostra il recipiente F pieno del liquido in esame, il cui livello affiora la chiavetta h_1, per cui penetra la corrente d'aria spinta dalla pera di gomma G; l'aria lambisce così la superficie del liquido, esce da una seconda chiavetta h_2, e dopo

aver circolato nella camera di ionizzazione, è richiamata nel recipiente F, e così via.

Quando i gas si svolgessero da sorgenti naturali in gran copia, si raccolgono in un gasometro, e si fanno entrare nella camera di ionizzazione da un foro e uscire lentamente nell'atmosfera dall'altro.

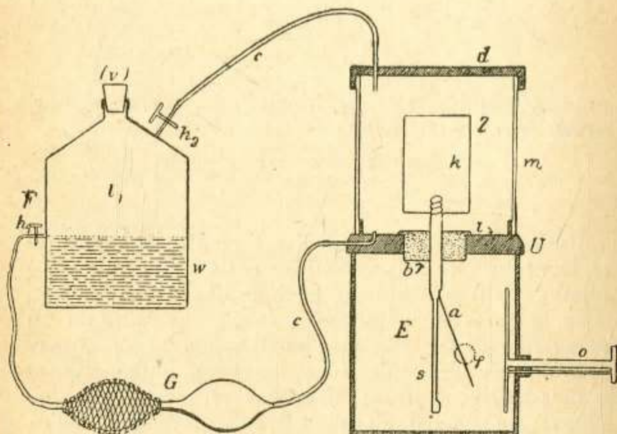


Fig. 509.

Nelle ricerche di radioattività hanno molta importanza certi depositi formati da alcune sostanze radioattive alla superficie dei solidi. Tali depositi sono così tenui da sfuggire ad ogni altra ricerca fisica, che non sia il metodo elettrico in quistione: essi vengono per lo più raccolti su fili che si avvolgono in appositi telai, e s'introducono nella camera di ionizzazione sospendendoli al coperchio.

Ripetiamo che, per un'esatta misura, è necessario che si stabilisca in ogni caso la corrente di satu-

razione; questa, nell'istrumento in discorso, si stabilisce fra il collettore k e le pareti della camera di ionizzazione, la quale perciò deve essere messa in comunicazione col suolo.

425. **Ipotesi sulla radioattività.** — Da che e come sono prodotti i fenomeni dei corpi radioattivi? Bisogna contentarsi di ipotesi: in primo luogo v'ha chi suppone esistere nello spazio certe radiazioni propagantisi continuamente in ogni direzione: tutti i corpi sarebbero colpiti da queste ipotetiche radiazioni, le quali con il loro urto tenderebbero a staccarne quelle particelle che costituiscono i raggi α e β; ma il distacco si effettuerebbe solo in alcuni corpi, e questi sarebbero appunto i corpi radioattivi, i quali funzionerebbero così da trasformatori di eergia: il calore emesso dal radio sarebbe poi l'equivalente di parte dell'energia di cotali radiazioni. Questa ipotesi ha avuto poco favore.

Ne è prevalsa invece un'altra basata sulla teoria degli elettroni: ricordiamo che, stando a questa ipotesi, gli atomi sono sistemi di elettroni dotati di grandissima velocità; e la differenza fra gli atomi chimicamente diversi consiste nel diverso numero e nel diverso modo di aggregazione degli elettroni componenti.

L'ipotesi sussidiaria da aggiungere per spiegare la radioattività è che alcune specie di atomi non sono sistemi completamente stabili, ma invece sistemi che più o meno lentamente si trasformano. Nei corpi radioattivi avverrebbe pertanto che, ad ogni istante, qualche atomo si sfascia; gli elettroni che lo costituivano restano in parte liberi, e in parte riuniti in nuovi gruppi formano transitoriamente atomi di specie nuova, che alla lor volta si trasformano in altri fino a raggiungere un'aggregazione relativamente stabile. È questa la teoria della

disintegrazione atomica. Codeste trasformazioni di struttura sono poi accompagnate da manifestazioni di energia che rendono palese l'energia cinetica degli elettroni, e l'energia potenziale dovuta alle forze reciproche esistenti tra loro. Lo sviluppo di calore che accompagna le trasformazioni radioattive avrebbe dunque origine analoga a quella del calore che si produce in molte reazioni chimiche: invece di corrispondere ai cambiamenti di aggregazione degli atomi nelle molecole, corrisponderebbe a cambiamenti di aggregazione degli elettroni negli atomi.

Naturalmente l'atomo, modificandosi, cambia anche le proprietà fisiche e chimiche; viene cioè ad appartenere ad una specie chimica diversa. Il Rutherford con una lunga serie di esperienze ingegnosissime è riuscito, secondo questo ordine di idee, a stabilire la genealogia — per così dire — degli elementi radioattivi. Ad esempio, dall'atomo di uranio, per l'espulsione di una particella α, si ha l'atomo di un altro elemento detto *radio uranio*; questo, instabilissimo, cambia natura senza espulsione di raggi, trasformandosi in *uranio X*. L'uranio X emette raggi β, e quindi anche raggi γ, e si trasforma in *jonio*; il jonio, con l'espulsione di una particella α, si trasforma nell'*atomo di radio.* L'atomo del radio poi dà luogo all'atomo di *emanazione*, espellendo un'altra particella α. Gli atomi dell'emanazione del radio subiscono una disintegrazione immensamente più rapida; contemporaneamente si produce una corrispondente quantità di gas *elio.* Questa scoperta che comprova la trasformazione di un elemento in un altro fu dapprima contestata, ma oggidì la produzione dell'elio da parte dell'emanazione è ritenuta un fatto indiscutibile. L'elio risulta dalle particelle α emesse dall'emanazione le quali hanno

perso la loro carica, e questa è la ragione che esso accompagna sempre i materiali radioattivi.

Dall'emanazione poi nascono, generati l'uno dall'altro, i corpi radioattivi seguenti: *radio A*, *radio B*, *radio C* che emette raggi α, β e γ, *radio D*, *radio E*, *radio F*. Quest'ultimo coincide col polonio. Il polonio pertanto è l'ultimo rappresentante della famiglia dei corpi radioattivi che ha per *capostipite* l'uranio. La figura 510 rappresenta la genealogia di questa famiglia.

Il torio e l'attinio sono alla lor volta, capostipiti di due altre distinte famiglie di sostanze radioattive. — In ogni caso è molto diverso dall'uno all'altro il tempo di trasformazione: così, per esempio, si calcola che occorrono 1700 anni circa perchè una massa di radio si trasformi in atomi di emanazione, mentre per una massa di questa bastano soltanto 4 giorni circa, affinchè metà dei suoi atomi si trasformi in *radio A*.

La maggior velocità di disattivazione dell'emanazione in confronto del radio, dipen-

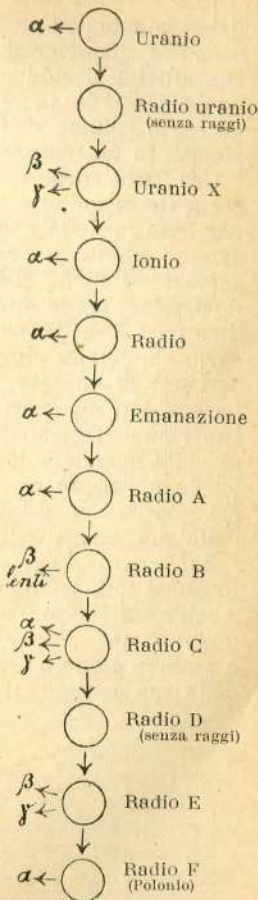


Fig. 510.

de dalla maggior proporzione degli atomi che subiscono la disintegrazione in un dato tempo. Se la sua attività si riduce a metà in 4 giorni, è lecito concludere che la metà degli atomi contenuti in un certo volume dell'emanazione del radio si trasforma in tal tempo.

Ora ogni corpo radioattivo come il radio è una sorgente di materia, di elettricità, di energia, giacchè esso proietta continuamente particelle elettrizzate ed emette calore. Dato il principio della conservazione della energia, sorge naturalmente la domanda: donde proviene l'energia de' corpi radioattivi? Non da cause esterne, e perciò è necessario ammettere che i loro atomi siano altrettanti serbatoi di energia, come si è detto innanzi. In base a dati numerici approssimativi si calcola che l'energia dell'atomo di radio è centinaia di migliaia di volte maggiore di quella corrispondente alla molecola dell'acqua, e occorrono decine di anni perchè sia possibile constatare una sensibile variazione della sua massa e del suo peso.

Sul nostro globo tracce di radio si riscontrano in quasi tutti i fanghi e sorgenti termali, come ad Abano e a Battaglia in Italia, ecc.; tuttavia la sua quantità deve essere verosimilmente molto piccola, e tendere a diminuire coll'andar del tempo, a causa della sua continua trasformazione in altre sostanze.

CAPITOLO XVI.

Macchine dinamoelettriche. Telefono e microfono. — Telegrafia senza fili.

126. **Macchine dinamoelettriche a corrente continua.** — Ora è necessario descrivere quelle macchine dette *dinamoelettriche*, che trasformano in elettrica la potenza meccanica fornita da una ruota idraulica o da una macchina a vapore. Col loro mezzo si possono ottenere correnti molto intense e relativamente di poco costo, le quali hanno reso possibile negli ultimi anni tutte le grandiose e meravigliose applicazioni dell'elettricità che stanno rinnovando il mondo

Una *dinamo* (si chiama così per brevità) è costituita essenzialmente da due organi, l'induttore e l'indotto: il primo destinato a produrre un intenso campo magnetico od un sistema di campi magnetici, si compone di un elettromagnete o di una corona di elettromagneti, dove i poli di nome contrario si succedono con alterna vicenda e regolare intervallo. Secondo il loro numero, l'induttore si dice *bipolare*, *quadripolare* o *tetrapolare*, *esapolare*, ecc.; e, in generale, quando sono parecchie coppie di poli, senza specificarne il numero, *multipolare*. Quando poi l'in-

duttore è formato da una o più calamite permanenti, la macchina è detta *magnetoelettrica:* di queste omai se ne costruiscono soltanto di piccola potenza, e per usi speciali.

L'indotto, detto anche *armatura,* consiste in un sistema di spirali disposte simmetricamente e ad eguale distanza rispetto all'asse di rotazione; questo poi è perpendicolare alle linee di forza del campo induttore. Le spirali sono di fili di rame rivestiti di materiale coibente per impedire i contatti tra spira e spira, e si avvolgono su nuclei di ferro.

Col movimento impresso all'armatura si destano nelle singole spire le forze elettromotrici indotte dal campo che trascorrono, le quali, raccolte come vedremo, si compongono in una risultante che è la forza elettromotrice del generatore. Evidentemente l'induzione richiede soltanto il moto relativo delle spire e del campo magnetico in cui si trovano; e perciò si intende come le stesse forze elettromotrici si svilupperebbero nelle spire dell'armatura, se si tenesse questa ferma, e si facesse rivolgere a rovescio intorno ad essa, e con eguale velocità, l'induttore.

Giusta la legge di Lenz, codeste forze elettromotrici, e quindi le correnti, hanno una direzione tale da reagire contro il movimento che le suscita, in modo che esse tendono a produrre una rotazione di senso contrario. Perciò il lavoro che si deve spendere per mantenere la macchina in moto quando il circuito è chiuso e le correnti circolano nelle spire dell'indotto, è ben maggiore di quello richiesto a far girare l'armatura a circuito aperto; in questo caso il lavoro si ridurrebbe soltanto a quello di imprimere all'armatura la forza viva corrispondente alla velocità del movimento, e all'altro per

superare gli attriti e le ordinarie resistenze al moto. La differenza tra il consumo di potenza richiesto per la rotazione dell'armatura a circuito chiuso, e quello a circuito aperto, dà la misura del lavoro che viene trasformato in energia elettrica: di questa poi una frazione si converte in calore per l'effetto Joule consistente nel riscaldamento delle spire percorse dalle correnti, per le correnti parassite nel nucleo dell'armatura (correnti di Foucault), e per l'isteresi magnetica.

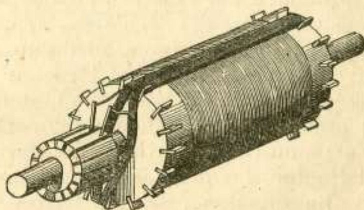


Fig. 511.

Le armature più comuni sono l'anulare e quella a tamburo: la prima è l'armatura che abbiamo descritto innanzi (fig. 516); la seconda differisce in sostanza dalla precedente, perchè la spirale similmente frazionata si avvolge solo all'esterno del nucleo. L'armatura a tamburo Siemens (fig. 511) consiste in un cilindro di ferro dolce, sul quale esternamente e parallelamente alle generatrici è avvolto il filo, suddiviso in più spirali equidistanti: ciascuna è formata da più spire i cui piani passano per l'asse, e ogni spirale comunica con la seguente per mezzo di un collettore identico a quello della macchina Gramme, in modo che la fine di una e il principio della seguente siano saldate ad una medesima lamina collettrice. Due spazzole poste

in un piano sensibilmente perpendicolare al campo, raccolgono una corrente continua come nella macchina Gramme.

Concludendo, la differenza delle due armature è che in quella anulare il filo si avvolge sull'anello esternamente e internamente, mentre nell'altra a tamburo esso si avvolge soltanto all'esterno: i due sistemi però danno risultati presso a poco equivalenti.

L'asse di rotazione è in entrambe perpendicolare alla direzione del campo induttore, come si è detto. Ad attenuare poi la perdita causata dalle correnti parassite nel nucleo dell'armatura, invece di farlo massiccio, lo si compone di un mazzo di fili o di listini di ferro, isolati tra loro per mezzo di una fine copertura di carta, di una mano di vernice, o di una leggera ossidazione superficiale.

Nella macchina Gramme (fig. 512), l'armatura ad anello del Pacinotti è abbracciata, con agio appena sufficiente alla rotazione, da due grossi pezzi prismatici di ferro, attaccati alle branche degli induttori, e incavati a seconda del suo contorno: sono detti *pezzi polari* o *mascelle* per la loro forma. L'aggiunta di tali pezzi giova a diminuire la resistenza magnetica della dinamo, al che contribuisce pure efficacemente la presenza del nucleo di ferro nell'armatura. Difatti il flusso Φ che esce dalla mascella di polarità nord o positiva, attraversa il breve *intraferro* che la separa dal nucleo dell' armatura; qui esso viene concentrato nell'anello di ferro a motivo della sua grande permeabilità, e si divide in due rami eguali e simmetrici che si congiungono poi di fronte alla mascella negativa, dove entra superando il secondo intraferro (fig. 513). La *resistenza magnetica* della dinamo, o *riluttanza* come pur si dice, si compone pertanto di quella dell'induttore, dei due intraferri, e delle due metà del

nucleo dell'armatura percorse dalle due derivazioni del flusso. Ma per penetrare nell'anello, il flusso

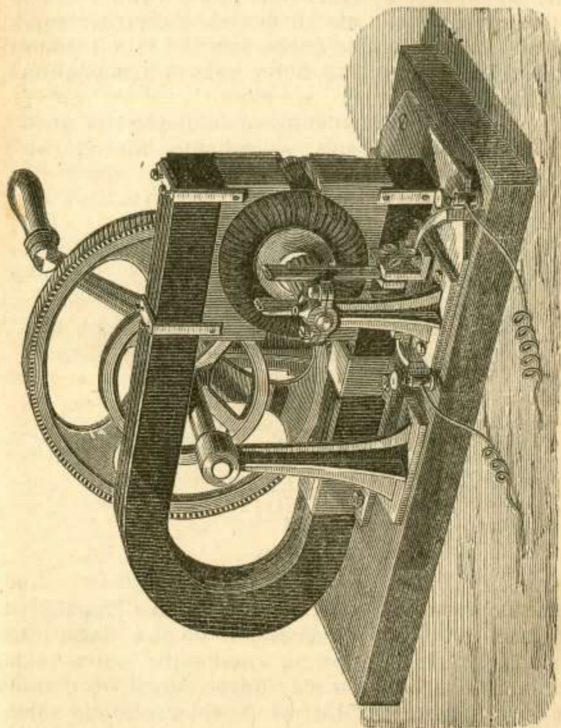


Fig. 512.

deve attraversare le spire di rame che avviluppano l'anello stesso, e queste devono perciò essere percorse da correnti di induzione per tutto il tempo in cui l'armatura è mantenuta in rotazione

Per spiegare il giuoco della macchina, è indifferente che l'anello di ferro dolce resti immobile, e si faccia scorrere tutto all'intorno l'insieme delle spire; ovvero che il nucleo giri trascinando nel suo movimento le spire, giacchè i poli indotti nell'anello restano fissi nello spazio. Quest'ultima, evidentemente, è la disposizione pratica; ad evitare poi le correnti indotte nella massa dell'anello, o correnti di Foucault, ricordiamo ciò che si è

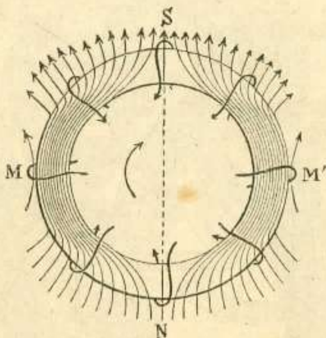


Fig. 513.

detto sopra, ossia che bisogna formare l'anello con un fascio di fili di ferro isolati gli uni dagli altri.

Considerando dapprima una spira unica, supponiamo che essa scorra lungo l'anello e compia un intero giro (fig. 513): se considereremo la variazione del flusso che attraversa la sua area, mentre essa, passando per *S*, va dalla zona neutra *M* ove il flusso è $^1/_2$ Φ all'altra zona neutra *M'* ove il flusso è $- ^1/_2$ Φ, troveremo che detta variazione equivale a Φ: una variazione eguale e di segno con-

trario si produce nella stessa spira, nella seconda parte del suo percorso da M' in M, passando per N: il piano MM' perpendicolare ad SN è detto, a cagione del cambiamento di segno della forza elettromotrice, *piano di commutazione*.

A tali variazioni del flusso nella spira corrisponderanno delle forze elettromotrici, che saranno per la regola di Fleming di senso inverso da una parte e dall'altra del diametro MM', e i cui valori in un intiero giro possono essere rappresentati dalle ordinate della curva ABA' (figura 514). Difatti chiudendo l'elica E con un galvanometro (fig. 515), e facendola scorrere lungo l'anello, si osserveranno tante inversioni di corrente quanti sono i passaggi per la zona neutra mm': essa in un intiero giro sarà dunque percorsa da una corrente alternata, cioè da una corrente che muta periodicamente di senso, e la cui intensità varia come le ordinate della curva suddetta ABA'.

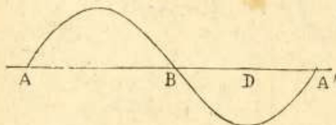


Fig. 514.

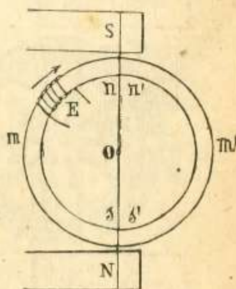


Fig. 515.

Consideriamo ora, a un dato istante, l'insieme delle spire in movimento: in tutte quelle che si muovono da un lato del piano di commutazions, le forze elettromotrici hanno lo stesso senso, il quale è contrario a quello delle forze elettromotrici attive nelle spire che si muovono dall'altro lato. I tronchi

della spirale che nella fig. 516 riescono al disopra del diametro *a b* si possono perciò paragonare ad altrettante coppie di una pila (di forza elettromotrice diversa), la quale avrà, per es., il polo positivo in *a* e il negativo in *b*: parimenti quelle sotto il detto diametro equivarranno alle coppie di una pila che avrà pure in *a* il suo polo positivo e in *b* quello negativo. Insomma il sistema equivarrà ad una combinazione di due pile *P*, *P'* disposte in superficie, aventi, per es., i poli positivi riuniti in *A*, e i poli negativi in *B* (fig. 517): in questi

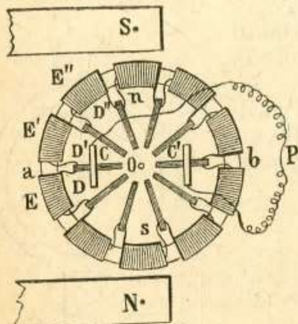


Fig. 516.

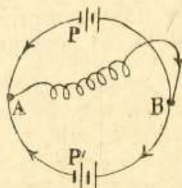


Fig. 517.

punti dunque debbono collocarsi le spazzole destinate a portare la corrente nel circuito esterno *A B*. Durante la rotazione poi ciascuna lamina del collettore va prendendo successivamente il posto di quelle che la precedono, e perciò passerà successivamente per le fasi delle altre: le spazzole si appoggiano alle due sezioni del collettore che presentano la massima differenza di potenziale, e il circuito esterno sarà percorso da una corrente ogni volta che due lamine opposte del collettore verranno a contatto con esse. Si avrà dunque una serie rapidissima di correnti,

la cui successione praticamente si potrà considerare come una corrente continua.

Le scintille del collettore, le correnti di Foucault che non si sopprimono mai completamente, rappresentano una pura perdita di energia; ma se si trascura tale dissipazione di energia, si può ritenere che il lavoro per mantenere costante la velocità della macchina, superi quello richiesto a circuito aperto, di quel tanto che si richiede a produrre l'energia elettrica, come si è detto superiormente. L'energia elettrica spesa nel circuito equivale al calore che vi si svolge secondo la legge di Joule.

Se il flusso d'induzione Φ non variasse, basterebbe mantenere costante la velocità affinchè l'elettromotore si comportasse come una pila; e la forza elettromotrice e l'intensità si manterrebbero proporzionali alla velocità suddetta. Ciò si verifica con buona approssimazione nelle macchine magneto-elettriche (fig. 512) e nelle dinamo ad eccitazione indipendente, cioè in quelle dinamo dove le elettrocalamite del campo sono eccitate da una corrente fornita da altro elettromotore; ma se invece si tratta di una dinamo *autoeccitatrice*, l'intensità del campo e il flusso Φ variano perchè dipendono dall'intensità i della corrente magnetizzante, e questa dipende a sua volta dalla resistenza esterna.

Per renderea utoeccitatrice una dinamo, si mette a profitto il magnetismo residuo del nucleo dell'induttore: in grazia di tale magnetismo residuo, quando si fa ruotare l'armatura, si suscita nella sua spirale una forza elettromotrice che dapprima è molto debole; essa però cresce rapidamente se la corrente raccolta dalle spazzole, od una sua derivazione, viene trasmessa nelle spirali dell'induttore per aumentarvi l'intensità della magnetizza-

zione. A tal fine si può congiungere una delle spazzole con un termine della spirale dell'induttore (fig. 518), l'altra spazzola ed il secondo termine della detta spirale coi capi del circuito esterno. In questa maniera la spirale dell'induttore viene inserita di seguito alla conduttura esterna nel circuito della

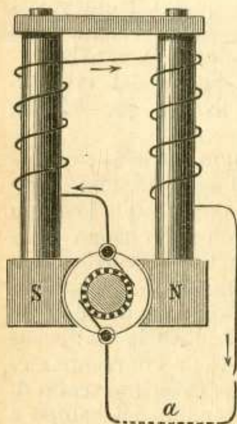


Fig. 518.

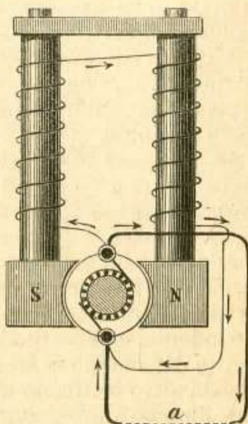


Fig. 519.

dinamo, e perciò questa si dice *eccitata in serie:* allora avviene che un aumento della resistenza esterna, non solo indebolirà la corrente per la legge di Ohm, ma col diminuire della corrente diminuirà anche il flusso Φ, e però la forza elettromotrice.

Accade l'opposto nel caso dell'*eccitazione in derivazione* rappresentato dalla fig. 519, nel quale si congiungono rispettivamente a ciascuna delle spazzole un termine della spirale dell' induttore e un

capo del circuito esterno; cosicchè la corrente uscendo dall'armatura si divide in due rami, servendo una diramazione a fornire alla conduttura l'energia che le abbisogna, e l'altra ad eccitare l'induttore; in questo caso, al crescere della resistenza esterna, cresce anche la corrente magnetizzante e con essa la forza elettromotrice.

In ambo i casi importa che si spenda nell'eccitazione appena quel tanto di energia che è necessario: ora questa è misurata dal prodotto della resistenza della spirale dell'induttore per il quadrato della corrente che la percorre; perciò nel caso dell'eccitamento in serie, nel quale la detta spirale è percorsa dall'intera corrente, importa che la sua resistenza sia piccola; mentre in quello della eccitazione in derivazione conviene che la sua resistenza sia grande, per non derivare una corrente soverchia.

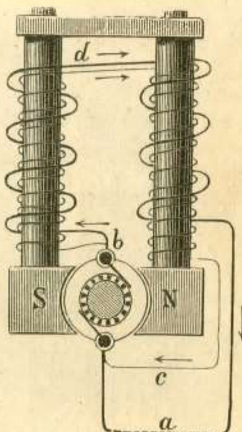


Fig. 520.

I due modi di eccitazione possono combinarsi insieme allo scopo di mantenere costante la corrente nel circuito esterno, malgrado le eventuali variazioni della sua resistenza o del consumo di energia che vi si effettua: a tal uopo sui magneti del campo si avvolgono due eliche distinte, una di piccola resistenza riunita in serie col conduttore esterno, e l'altra di grande resistenza formante un ramo derivato come si vede nella fig. 520. Questa dinamo allora è detta ad eccitazione *composta* od

anche *compound*. È bene disporre un reostato nel circuito dell'induttore: si potrà così, al bisogno, far variare la corrente eccitatrice, e quindi il flusso magnetico e la forza elettromotrice della dinamo: tale reostato prende il nome di *regolatore del campo*.

La prima macchina Gramme coll'armatura Pacinotti migliorata nei particolari di costruzione,

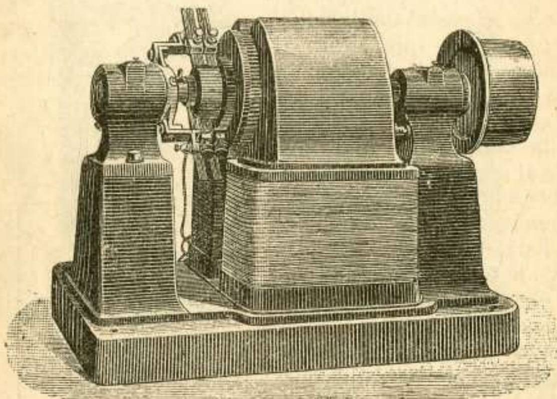


Fig. 521.

comparve nel 1871: era una macchina magneto-elettrica; il campo veniva fornito da fasci magnetici Jamin a ferro di cavallo con grosse appendici di ferro, come appunto la macchina della fig. 512. Ma non si tardò ad applicare a queste macchine il principio delle dinamo e dell'autoeccitazione.

Dopo Gramme i costruttori di dinamo sorsero a centinaia: la fig. 521 rappresenta una delle forme più semplici e più vantaggiose di codeste macchine; fu ideata dal compianto ing. B. Cabella direttore

del Tecnomasio Italiano, e copiata subito da altri: essa è conosciuta sotto il nome di *tipo superiore*, dalla posizione dell'armatura. L'induttore è formato da un' elettrocalamita con i nuclei verticali di forma rettangolare, terminanti in due robuste espansioni polari arcuate, tra le quali ruota l'armatura ad anello della macchina Gramme, o quella a tamburo di Siemens.

427. **Reazione dell'indotto; spostamento delle spazzole.** — Se il circuito esterno resta aperto, i fatti sono rigorosamente conformi alla teoria che precede: una differenza di potenziale si stabilisce fra le due spazzole che sono i poli della macchina, e questa differenza è massima quando la linea che le unisce è nel piano di simmetria degli induttori. Inoltre, per un valore costante del campo, la differenza di potenziale è proporzionale alla velocità di rotazione dell'anello. La distribuzione del flusso di induzione in quest'ultimo è quella rappresentata dalla fig. 513, massima cioè sopra le due sezioni poste nel diametro MM' perpendicolare alla direzione del campo, minima in corrispondenza al diametro SN: cosicchè la forza elettromotrice indotta nelle spire dev'essere nulla in MM' dove il flusso che le attraversa non varia, e massima dinanzi a S ed N ove tale variazione è la maggiore di tutte. A circuito aperto difatti le forze elettromotrici indotte in una metà dell'anello sono eguali e contrarie a quelle dell'altra metà; onde nelle spire non circolano correnti che possono magnetizzare l'anello.

Quando invece il circuito è chiuso fra le spazzole C, C' dal conduttore esterno P fig. 516, la corrente indotta calamita l'anello, destandovi due poli opposti nei punti a, b di fronte ai punti di derivazione. Il flusso corrispondente a tale magnetizzazione varia

con rapidità mutando di segno nei punti suddetti; e però nelle eliche contigue $E D$, $E' D'$ ecc. che vi sono vicine, desta delle forze elettromotrici notevolmente diverse, che a motivo dell'autoinduzione dell'eliche stesse daranno luogo a scintille di estracorrente, quando la spazzola striscerà sopra alle corrispondenti lamine del collettore. Per evitare tali scintille che danneggiano quest'organo, l'esperienza insegna di spostare le spazzole di un certo angolo nel verso della rotazione. Se il diametro che congiunge la nuova posizione delle spazzole e $X X'$ invece di $M M$ (figura 522), è segno ch'esso coincide con la nuova direzione del campo indotto $O A$; questo, d'altra parte, deve essere normale al campo $O B$ risultante di $O A$ e del campo inducente $O H$. Ne segue una diminuzione, come si è detto, del campo risultante, e una distorsione del flusso magnetico: è tale diminuzione che si chiama *reazione dell'indotto*; e poichè essa implica una diminuzione nella potenza della macchina, conviene farla piccola il più possibile, procurando che il campo inducente $O H$ abbia una intensità molto maggiore di quella massima che potrà acquistare il campo indotto $O A$.

Fig. 522.

Se la macchina funziona invece come ricevitrice, e vi si conduce per le spazzole una corrente della medesima intensità e dello stesso senso della precedente, l'anello si metterà a girare in senso contrario: ma la posizione delle spazzole determinata

dalla condizione di sopprimere le scintille, sarà ancora quella di prima. Onde, se la macchina funziona come motore, il diametro corrispondente ai punti di contatto delle spazzole avrà girato del medesimo angolo, ma non nello stesso senso del movimento, sibbene in quello contrario.

128. **Dinamo bipolari e multipolari.** — Perchè si produca la corrente continua, occorre che le spire dell'indotto passino rapidamente in parti del campo magnetico nelle quali il flusso di forza, varii d'intensità o di senso; la qual cosa si ottiene, come abbiamo ora veduto, facendole passare alternativamente da un polo magnetico ad un altro dell'induttore. Quando la dinamo deve avere grandi dimensioni, bisognerebbe, per raggiungere la necessaria velocità, comunicare alla macchina una rotazione troppo grande, incompatibile colla sua resistenza e colla pratica. Si elimina la difficoltà costruendo delle dinamo multipolari, aventi cioè parecchie coppie di poli, e facendo in modo che le spire dell'indotto passino da un polo nord a un polo sud, da questo a un polo nord, e così via. Si vede che il tempo occorrente affinchè una spira dell'armatura passi da un polo ad un altro, è una frazione soltanto di quello richiesto per un intero giro: in tal guisa, se la parte rotante della dinamo ha un grande diametro, si soddisfano insieme e la condizione suddetta del rapido passaggio dell'indotto dinanzi ai poli, e le esigenze della stabilità della macchina, poichè è evidente che, a motivo della forza centrifuga, la velocità non può superare un certo limite.

L'industria fornisce macchine di tutte le potenze: se ne costruiscono di quelle che assorbono appena qualche centinaio di watt, ed altre che assorbono delle centinaia di chilowatt.

Per la forza elettromotrice d'ordinario non si oltrepassa i 2000 o 3000 volta; i metalli impiegati, oltre il rame per l'avvolgimento delle armature e per le eliche degli induttori, sono il ferro e la ghisa. Il ferro è molto più permeabile, ma è più difficile a lavorare, e il suo impiego eleva il prezzo delle macchine; la ghisa si presta alla fusione ed è molto più economica; bisogna però aumentarne la massa per ottenere la stessa conduttività magnetica.

Il modo di funzionare di una dinamo è rappresentato dalla sua *caratteristica*, la quale viene per lo più determinata sperimentalmente, portando su una retta orizzontale, presa come asse delle ascisse, i valori delle intensità della corrente misurati con l'amperometro e ottenuti facendo variare la resistenza esterna, e come ordinate le corrispondenti differenze di potenziale ai serrafili della dinamo, misurate coll'elettrometro o col voltometro: ci duole di non poter entrare a tale riguardo in maggiori particolari.

Ricorderemo piuttosto che della potenza meccanica W_m assorbita da una dinamo, una parte va perduta a motivo degli attriti, delle correnti parassite che si destano nelle masse metalliche, ecc., mentre un'altra parte W_e si trasforma in energia elettrica; ma anche di questa si può nel conduttore interpolare utilizzare soltanto una parte W_u, perchè una frazione si trasforma in calore nelle spire dell'armatura e nelle eliche inducenti.

È detto *rendimento industriale* di una dinamo il rapporto $W_u : W_m$ della potenza disponibile e della potenza meccanica consumata; esso varia dall'80 al 90 p. 100.

Si chiama *rendimento elettrico* il rapporto $W_u : W_e$ della potenza disponibile alla potenza elettrica totale; esso può arrivare al 95 %.

129. **Applicazioni elettriche; trasporto elettrico dell'energia.** — Le varie applicazioni elettriche si risolvono tutte in una parziale trasformazione dell'energia elettrica, che sotto forma di corrente viene trasmessa ad una distanza più o meno considerevole. Nei processi elettrolitici si consuma energia elettrica in un lavoro chimico; negli impianti di illuminazione, essa si trasforma in luce; nei fornelli elettrici, in calore, ecc. È largamente usata a produrre del lavoro meccanico per mettere in azione le macchine di un opificio, le ruote di una vettura o di un treno. I campanelli elettrici, gli orologi elettrici, gli apparecchi telegrafici, ecc., sono altrettanti esempi di trasformazione dell'energia meccanica.

In un impianto elettrico qualunque occorrono, evidentemente, un *elettromotore* o *generatore* della corrente, un *collettore* dove si opera la voluta trasformazione, e i conduttori che li collegano costituenti la *linea* o *condultura.*

Quando l'energia elettrica deve servire per un certo numero di motori, lampade, ecc., sparsi in località diverse, la conduttura offre delle diramazioni opportune che costituiscono una *rete di distribuzione.*

Il problema generale del *trasporto elettrico dell'energia* può porsi in generale così: in un certo luogo v'ha una sorgente continua di energia sotto una forma qualsiasi; si vuole utilizzarla in un luogo più o meno lontano. Si stabilisce nel primo un elettromotore (generatore) che possa ricevere l'energia sotto quella data forma, e nel circuito si disporrà l'apparecchio (collettore) che, ricevendo la corrente, restituisca l'energia sotto la forma desiderata.

Una dinamo, una batteria di accumulatori costituiranno il generatore; un bagno elettrolitico,

delle lampade elettriche, dei motori saranno i collettori.

Ma la soluzione di trasportare l'energia elettrica a grandi distanze in modo economico non era da sperarsi dalle correnti continue. E in vero, i fattori dell'energia, come sappiamo, sono la forza elettromotrice e l'intensità: ora, nelle dinamo a corrente continua non è *praticamente* possibile elevare la forza elettromotrice oltre un dato limite; e quindi per una considerevole potenza da trasmettere, farebbe d'uopo una grande intensità. Ma a tal fine occorrerebbe costrurre delle dinamo di dimensioni straordinarie, e aumentare grandemente la sezione dei fili conduttori; tutto ciò porterebbe le spese d'impianto ad un valore enorme. Il problema trovò invece la sua pratica ed economica soluzione nelle applicazioni delle correnti alternate, delle quali pertanto è ora necessario dare almeno un cenno.

430. **Correnti alternate.** — Una corrente alternata non solo rovescia la direzione ad uniformi intervalli di tempo, ma varia continuamente d'intensità con un andamento periodico che, quando è regolare, può rappresentarsi graficamente con una linea ondulata detta sinusoide, perchè riproduce fedelmente le variazioni di quella funzione circolare che è il seno. In tal caso difatti la intensità cresce da zero a un massimo, poi decresce con legge simmetrica di nuovo a zero; indi risorge in direzione contraria sempre con lo stesso andamento sino a un massimo eguale al precedente, per ridiscendere da capo a zero e riprendere la primitiva direzione, e così via. Le dette vicende o fasi sono fedelmente rappresentate dall'andamento di una delle due curve della fig 523, da quella per esempio *A B C D E F*...... quando si convenga che i segmenti (ascisse) contati a partire da *A* e presi sull'asse *A H*

rappresentino i tempi, e le perpendicolari (ordinate) innalzate dai punti di *A H* fino all'incontro della curva indichino le corrispondenti intensità.

Si dice periodo il tempo che separa due fasi consecutive, nelle quali l'intensità presenta la stessa grandezza e la stessa direzione. Ora si concepisce che due di tali correnti, tra di loro eguali, suscitate in circuiti distinti, possono presentare una serie di fasi identiche che si compiono simultaneamente, oppure con una discordanza uniforme. Di tali sistemi di correnti può dare un'idea quella le cui ondulazioni sono rappresentate dalla curva *A B C*... suddetta, e l'altra rappresentata dalla curva punteggiata *A' B' C'*......: entrambe presentano le identiche fasi, ma una è costantemente in ritardo di fase sull'altra di $^1/_4$ del periodo; allora gl'istanti in cui una si estingue, coincidono con quelli dove l'altra offre la massima intensità, e viceversa.

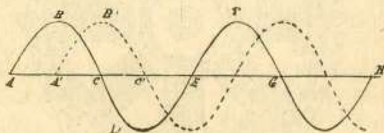


Fig. 523.

Vi sono dinamo a correnti alternate o *alternatori*, come per brevità si dice, *monofasi*, che producono una sola serie di correnti alternate come *A B C*....; e vi sono anche alternatori *polifasi* che forniscono più sistemi contemporanei di correnti alternate, aventi tutte lo stesso periodo — cioè un'eguale durata per un ciclo intiero di fasi —, ma così distribuite che il periodo di ciascun sistema precede della metà, di un terzo, di un quarto il periodo del sistema antecedente.

Nell'alternatore monofase di Gramme (fig. 524), l'indotto è fisso e l'induttore è mobile. Il primo ha la struttura ad anello, ed è formato come questo da un fascio di fili di ferro, intorno al quale sono avvolte 32 spirali: queste spire sono divise in 8 tronchi eguali con gli avvolgimenti alternativamente di senso contrario.

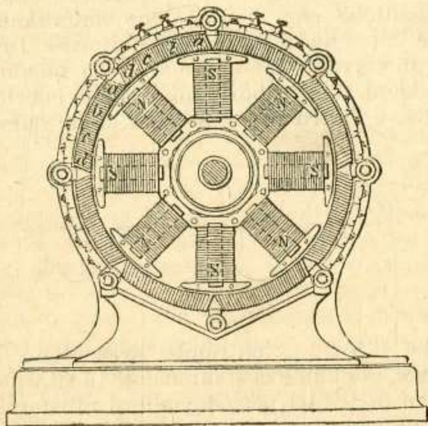


Fig. 524.

L'induttore è formato da un nucleo di ferro somigliante al mozzo di una ruota, da cui divergono secondo i raggi nuclei di ferro vestiti delle spirali eccitatrici, in modo da aversi altrettante elettrocalamite radiali con i poli alternativamente contrari. Questo induttore è fatto girare con rapidità nell'interno dell'anello; allora le elettrocalamite trascinano con loro il flusso d'induzione che percorre il rispettivo nucleo, e attraversa le differenti spire:

nascono così delle correnti alternate sensibilmente sinusoidali. La forza elettromotrice alternativa che si genera ha, in ciascun istante, il medesimo valore in tutti i tronchi; ed essendo le loro eliche fisse, gli estremi possono associarsi come si vuole.

Di regola gli alternatori sono a *eccitazione separata,* vale a dire gli induttori sono eccitati da una dinamo a corrente continua indipendente, detta *eccitatrice*, o da una batteria di accumulatori.

Dalla elementare descrizione di questo alternatore, si rileva che un pregio non indifferente consiste nella facilità della costruzione, della montatura e della riparazione, ciascun alternatore risultando, per così dire, di tante piccole dinamo distinte l'una dall'altra.

D'altra parte il cangiamento di senso della corrente non presenta alcuno inconveniente in molte applicazioni, e in particolare nella illuminazione elettrica. Ma dove l'impiego degli alternatori si impone a preferenza delle dinamo a corrente continua, è negli impianti per trasmettere a notevole distanza grandi quantità di energia: in tal caso l'economia dell'impianto dipende dall'alto valore della forza elettromotrice, il quale non si saprebbe raggiungere con le dinamo a corrente continua.

Per esempio, le dinamo che servono alla trasmissione dell'energia da Tivoli a Roma con una linea di 25 km., sono alternatori aventi la forza elettromotrice di *5000* volta ai loro serrafili; e così, con una corrente relativamente debole, e quindi con poca perdita in calore, arriva a Roma la potenza di oltre *1000* cavalli vapore. Similmente la Società Edison, con alternatori a elevatissime forze elettromotrici (13000 volta), trasporta da Paderno (Adda) a Milano più di 12000 cavalli di energia ecc. ecc.

131 **Trasformatori.** — Ma le correnti a così alti potenziali non possono essere direttamente utilizzate nell'industrie e nelle comuni applicazioni, e inoltre sarebbero assai pericolose alle persone; onde, per conciliare le varie esigenze dell'esercizio con l'economia del trasporto, si è pensato a trasformare queste correnti primarie di alto potenziale e di piccola intensità, in altre di basso potenziale ma d'intensità maggiore, con piccolo scapito della potenza. Diciamo e ed i la forza elettromotrice e l'intensità della corrente primaria alternativa in un dato istante; facendola agire su un circuito vicino, si può trasformarla in una corrente secondaria pure alternata, di forza elettromotrice e' e d'intensità i', tali che si abbia *prossimamente:*

$$e\,i = e'\,i';$$

ossia nel variare i due fattori, si ha cura che il loro prodotto, vale a dire la potenza elettrica, rimanga pressochè costante.

Servono all'uopo i *trasformatori;* essi sono apparecchi d'induzione fondati sugli stessi principi della macchina Ruhmkorff. Si capisce bene difatti, in seguito a quanto si è detto, che invece della corrente di una pila o di una batteria di accumulatori, si può, per eccitare tale macchina, trasmettere nella sua spirale primaria una corrente alternata; l'interruttore allora evidentemente non serve.

Se le due spirali sono ben proporzionate, si può ammettere con buona approssimazione che l'energia elettrica sviluppata in ogni *semiperiodo* nella spirale secondaria, equivalga a quella che si consuma nella primaria. Ma se tali quantità di energia sono eguali, possono esserne ben diversi i rispettivi fattori: si dimostra difatti che il rapporto delle forze elettromotrici si può ritenere eguale a quello delle spire del primario (circuito induttore) e del

secondario (circuito indotto). Detti cioè n e n' rispettivamente i numeri delle spire del primario e del secondario, e ed e' le rispettive forze elettromotrici, si ha:

$$\frac{e'}{e} = \frac{n'}{n}.$$

Se, per esempio, il primario ha un numero di spire decuplo del secondario, la differenza di potenziale ai termini di questo sarà il decimo della differenza di potenziale ai termini di quello; ma succede la cosa inversa pe' valori delle due intensità.

Nella macchina di Ruhmkorff, col mezzo di una corrente di grande intensità e di debole forza elettromotrice, si ottiene ai termini del filo indotto una elevata forza elettromotrice, capace di dare delle scintille. Nei trasformatori industriali si vuole, per lo più, raggiungere lo scopo opposto; talchè le correnti alternative primarie di alto potenziale devono percorrere quello dei due rocchetti che è composto di un maggior numero di spire: allora, per la ragione suddetta, si suscita ai capi dell'altro una differenza di potenziale periodicamente variabile e minore, in ragione del numero delle spire. E poichè i valori dell'intensità seguono la ragione inversa, il filo del primario si fa più sottile di quello del secondario.

In ogni trasformatore vi sono tre circuiti a considerare: il circuito elettrico primario, il circuito secondario e il circuito magnetico. Vi ha vantaggio a impiegare un circuito magnetico chiuso; inoltre bisogna che il nucleo di ferro sia diviso in fili o lamine verniciate per impedire il passo alle correnti di Foucault, che altrimenti si desterebbero normalmente al flusso magnetico, e tra-

sformandosi in calore costituirebbero una pura perdita di energia. Una forma semplice ed efficace di un trasformatore monofase è quella rappresentata dalla fig. 525: sopra un nucleo di fili di ferro dolce sono avvolti simultaneamente i due circuiti primario e secondario *AB*, *ab*, isolati però assai bene l'uno dall'altro, e dal ferro.

Un esempio farà comprendere la grande importanza dei trasformatori nel trasporto elettrico del-

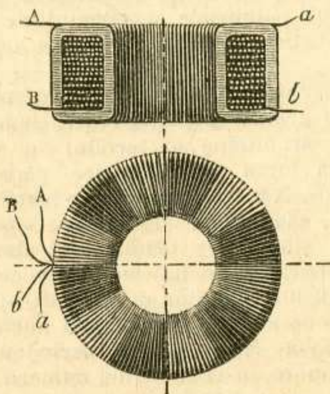


Fig. 525.

l'energia. Supponiamo che si vogliano distribuire 500 ampère sotto una forza elettromotrice di 100 volta, ossia l'energia elettrica di 50000 watt, a una distanza di 1000 metri, con una perdita del 10 per 100. Per la trasmissione diretta, il conduttore di *2000* metri deve avere una resistenza di 0,2 ohm; risulta che la sua sezione deve essere di 1600 millimetri quadrati, il suo peso di 28 tonnellate, il suo prezzo ben elevato.

Se si trasporta la stessa energia con una corrente di 50 ampère e la forza elettromotrice di 1000 volta, e si trasforma questa corrente primaria in una secondaria di 500 ampère e 100 volta, la resistenza del filo potrà essere di 2 ohm; la sua sezione di 16 millimetri quadrati, il suo peso di 280 kg., il prezzo assai mite.

432. **Trasformatori riduttori ed elevatori; trasformatori rotativi.** — I trasformatori di cui ci siamo occupati finora si chiamano *riduttori*, perchè hanno per scopo di sostituire nel luogo di utilizzazione, con lieve consumo di potenza, all'eccessiva tensione primaria una forza elettromotrice secondaria assai minore, adatta alle esigenze degli apparecchi di consumo. È bene ora osservare che le tensioni primarie molto elevate non sono prodotte direttamente dagli alternatori, ma si ottengono da alternatori di mediocre forza elettromotrice, interponendo tra essi e la conduttura dei trasformatori *elevatori*, che funzionano cioè a rovescio dei precedenti. All'uopo basta fare la spirale primaria di un filo grosso e di un piccolo numero di spire, e la secondaria di filo sottile e di un gran numero di spire, come nel rocchetto di Ruhmkorff. Con ciò la forza elettromotrice secondaria che opera nella conduttura sarà più elevata di quella dell'alternatore con il quale si collega la spirale primaria. La teoria e il calcolo del trasformatore non cambiano per effetto di tale inversione, che gli conferisce la qualifica di elevatore.

Le correnti alternate, mentre producono effetti calorifici e luminosi come quelle continue, non si prestano però per gli effetti elettrolitici; a tal fine bisogna prima raddrizzarle. Vi sono a tale intento speciali apparecchi detti *raddrizzatori*, come, p. e., le ampolle vuote Cooper-Hevitt, con anodo.

Ma di più largo uso sono i *trasformatori rotativi*, vale a dire, per mezzo della corrente alternata si fa ruotare un motore elettrico, il quale, a sua volta, comanda una dinamo a corrente continua. Le due armature, quella del motore a corrente alternata e quella della dinamo a corrente continua, vengono per lo più montate sullo stesso albero.

433. **Alternatori polifasi.** — Un alternatore polifase, come si disse nel (§ 430), è una dinamo che serve a generare contemporaneamente due o più sistemi di correnti alternate dello stesso periodo, ma spostate di fase le une rispetto alle altre. Esso non differisce dall'alternatore semplice o monofase che per la moltiplicazione de' rocchetti indotti, i quali formano tanti sistemi uguali e indipendenti quante sono le suddivisioni di fase della corrente sinusoidale. Descriviamo l'alternatore che fornisce soltanto due correnti alternate identiche, delle quali però l'una è in ritardo sull'altra di $\frac{1}{4}$ del periodo.

Ricordiamo che una corrente alternata semplice è prodotta dal passaggio alternativo dinanzi a ciascun rocchetto indotto di due poli magnetici di nome contrario N, S. Ciò premesso, supponiamo disposta su una corona fissa una serie di questi rocchetti, e siano in numero eguale a quello dei poli induttori trascinati da un movimento di rotazione (fig. 526). Sia A, A', A_1, A_1'....., la serie di rocchetti fissi; i loro avvolgimenti sono alternativamente fatti in senso contrario, affinché i poli opposti producano delle correnti che si sommino. Tutte le condizioni ritornano identiche, quando il medesimo polo ripassa davanti ai rocchetti dello stesso ordine A, A_1, A_2....., che hanno cioè l'avvolgimento nello stesso senso. Il periodo T della corrente è l'inter-

vallo di tempo compreso tra due consecutivi passaggi di uno stesso polo dall'uno all'altro di questi rocchetti.

Per produrre una seconda corrente identica, ma in ritardo di $\frac{1}{4}$ del periodo, basta intercalare tra l'uno e l'altro rocchetto A, A', A_1, A'_1, ..., un rocchetto identico ai precedenti, a eguale distanza, e avvolgere questi altri rocchetti B, B', B_1, B_1'.... alternativamente, come i primi, in verso contrario.

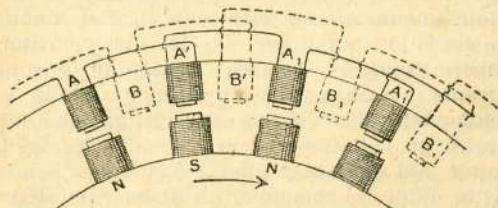


Fig. 526.

Si vede infatti che la distanza $A\,B$ è il quarto della distanza $A\,A_1$ che corrisponde al periodo della corrente alternata del primo circuito, quello cioè preso come punto di partenza, il quale fornisce la corrente di ordine *uno*.

I circuiti di questi due sistemi forniscono dunque le correnti con lo spostamento di fase di $\pm \frac{1}{4}$, che abbiamo chiamato correnti difasi.

Analogamente si ottengono altri sistemi di correnti; per esempio le *correnti trifasi*, correnti cioè di legge identica, le cui origini però si succedono a $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$ del periodo: sono queste le più usate nell'industria.

434. **Motori a corrente alternata monofase, asincroni.** — Se invece di una corrente continua, se ne trasmette una alternata in un motore a corrente continua, per esempio nella macchina della fig. 518, eccitandone l'induttore in serie, è chiaro che, invertendosi allora ad ogni semiperiodo la direzione del campo magnetico insieme a quella delle correnti nelle spire dell'armatura, le condizioni del movimento resteranno immutate, come se non avvenissero tali inversioni; quindi l'armatura girerà sempre nel medesimo verso. Il motore si avvia spontaneamente anche sotto carico, e si mantiene in movimento qualunque sia la sua velocità. Si avrebbero dunque le migliori attitudini dei motori a corrente continua, oltre il vantaggio della soppressione delle scintille alle spazzole, giacchè si può sostituire un collettore ad armille all'altro del tipo Gramme. Ma queste eccellenti condizioni sono sopraffatte dalla enorme quantità di energia elettrica che si sciuperebbe per isteresi nei nuclei di ferro, la quale perdita rimarrebbe grandissima anche facendo lamellare il ferro dell'armatura. Questa è la ragione che aveva sconsigliato l'impiego di tali motori per lavori di qualche entità: ma il dottor G. Finzi è riuscito a costrurre motori di questa specie che servono abbastanza bene nella trazione elettrica.

435. **Motori a corrente alternata monofase, sincroni.** — La perdita eccessiva nell'induttore si può evitare usando *motori a corrente alternata monofase sincroni* Per chiarire la cosa, supponiamo due alternatori eguali, che abbiano gli induttori eccitati da una corrente continua indipendente: facendo funzionare la prima macchina come *generatrice*, mandiamo la corrente così prodotta nei rocchetti dell'armatura della seconda che è la *ri-*

cevitrice. Perchè questa possa funzionare da motore, è necessario che il suo movimento sia sincrono con quello della macchina generatrice, altrimenti le azioni tra i poli fissi ed i rocchetti, anzichè favorire la rotazione, possono impedirla.

Bisogna quindi avviare il moto dell'armatura a vuoto finchè raggiunga la velocità di quella della generatrice, e cogliere, per il collegamento con quest'ultima, un istante in cui la fase della corrente sia quella opportuna; poi si applica gradualmente il carico al motore.

Se la rotazione si conserva uniforme in entrambe le macchine, si capisce che l'accordo si manterrà e le condizioni del movimento rimarranno immutate; ma se la rotazione di una delle armature si rallenta rispetto all'altra per una cagione qualunque, l'accordo delle fasi si rompe e verrà presto un momento in cui le spire dell'armatura del motore si trovano trasportate in campi la cui azione le respinge: il movimento allora si raffrena e cessa. Condizione indispensabile al buono esercizio di questi motori è dunque il *sincronismo* di fase nelle armature del motore e dell'alternatore.

Le applicazioni pratiche dei motori sincroni sono limitate a quei casi in cui il carico si conserva sensibilmente costante; ma se la resistenza da vincere nel lavoro del motore presenta delle variazioni un po' risentite, come accade spesso, l'effetto di tali ineguaglianze non manca di ripercuotersi nel movimento dell'armatura accelerandolo o ritardandolo, cosicchè ne segue facilmente la rottura del sincronismo e l'arresto del motore. Bisogna allora avviarlo di nuovo a vuoto, poi caricarlo a poco a poco, il che implica perdita di energia e di tempo.

Questi gravi inconvenienti dei motori a corrente alternata sincroni, non permettevano loro di con-

tendere il campo delle applicazioni industriali ai motori a corrente continua che lo tennero incontrastato sino ad alcuni anni or sono. Ma, d'altra parte, l'impiego delle correnti alternate si impone, per le ragioni che abbiamo dette, quando si tratta di trasmettere grandi potenze a rilevanti distanze: si può anzi affermare che la maggior parte dei trasporti di potenza meccanica per via elettrica ora in esercizio non si sarebbero potuti realizzare con le dinamo e i motori a corrente continua, e neppure con gli alternomotori di cui s'è parlato. Le cose cambiarono coll'invenzione dei motori polifasi.

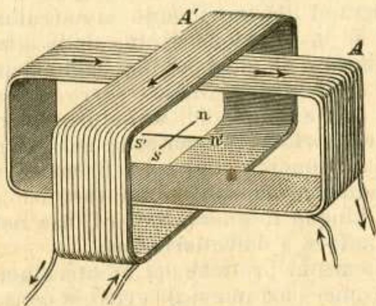


Fig. 527.

136. **Motori polifasi sincroni e asincroni.** — Da questo difetto sono esenti i *motori polifasi a campo rotante:* la priorità della invenzione è dovuta al compianto prof. Galileo Ferraris. Per intendere elementarmente in che cosa questa consista, supponiamo che due correnti alternanti secondo la legge sinusoidale, eguali, ma con una differenza di fase di un quarto del periodo, percorrano rispettivamente due spirali avvolte su due telai ad an-

golo retto fra loro, come è indicato schematicamente dalla fig. 527: nello spazio compreso dalle due spirali si ha allora un campo magnetico il quale ruota uniformemente, compiendo un giro ad ogni periodo, allo stesso modo che due moti oscillatori pendolari eguali e ortogonali, aventi la differenza di fase di $\frac{1}{4}$, si compongono in un moto circolare uniforme. Per vedere come questo accada nel nostro caso, ricordiamo che in un rocchetto percorso da una corrente continua, il campo magnetico nell'interno è proporzionale alla intensità della corrente e diretto parallelamente all'asse del rocchetto nel senso che dipende dalla direzione della corrente. Ciò posto, conduciamo dal centro comune O dei due telai le rette OX, OY perpendicolari fra loro e ai loro rispettivi piani (fig. 528); esse ci danno in quel punto la direzione dei rispettivi campi magnetici de' due rocchetti, i quali campi saranno costanti se le correnti non variano. Ma se queste sono alternate con legge sinusoidale, anche i loro campi seguiranno la stessa legge; e se il loro valore, in un dato istante, è dato dai segmenti OA, OB, si avrà un campo magnetico risultante OC, la intensità e la direzione del quale si ottiene componendo i campi OA e OB con la regola del parallelogrammo. Se ora si suppone che le due correnti abbiano lo stesso periodo e la stessa intensità massima, ma una sia spostata di fase rispetto all'altra

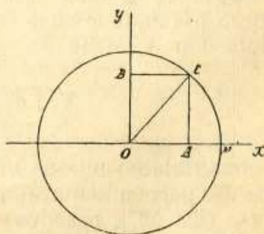


Fig. 528.

di $\frac{1}{4}$ del periodo, avviene che il campo risultante ha in ogni istante lo stesso valore OC, ma la sua direzione descrive con moto, uniforme, nello stesso tempo, una circonferenza. È facile dimostrarlo: difatti una corrente alternativa sinusoidale i, di periodo T, è data dalla relazione

$$i = A \,.\, \text{sen}\, 2\pi \frac{t}{T}$$

essendo A la sua intensità massima. E poichè la forza magnetica varia con la stessa legge, indicandola con X, si ha:

$$X = a \,.\, \text{sen}\, 2\pi \frac{t}{T}.$$

Imaginiamo adesso un secondo quadro pure verticale, perpendicolare al primo e concentrico con esso (fig. 527), percorso da un'altra corrente sinusoidale della medesima ampiezza, ma in ritardo di $\frac{1}{4}$ del periodo, cioè avente relativamente alla prima una differenza di fase di $-\frac{1}{4}$; i valori della sua intensità saranno allora espressi dalla relazione $i' = A\, \text{sen}\, 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{4}\right)$. Analogamente essa produrrà sul polo di una calamita posta nel centro dei due quadri una forza elettromagnetica pure orizzontale Y, diretta perpendicolarmente alla prima e avente per valore:

$$Y = a\, \text{sen}\, 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{4}\right) = a \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

Quando le due correnti agiscono simultaneamente, i due campi X ed Y si compongono in uno solo secondo la regola generale di composizione dei vettori.

Ora questi vettori X, Y essendo normali tra loro, il vettore risultante è l'ipotenusa di un triangolo rettangolo incessantemente variabile costruito sopra X e Y: si avrà dunque come forza o campo risultante:

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{a^2 \operatorname{sen}^2 \frac{2\pi t}{T} + a^2 \cos^2 \frac{2\pi t}{T}} = a;$$

ossia il campo è costante, ma gira attorno al centro comune dei due quadri con moto uniforme; le sue due componenti sono le proiezioni rettangolari del raggio di un cerchio, che ruoti con movimento uniforme.

Da ciò risulta che per l'azione simultanea di due correnti alternate eguali che percorrono due rocchetti aventi gli assi normali tra loro, e spostate l'una rispetto all'altra di $\frac{1}{4}$ del periodo, cioè presentanti fra esse una differenza di fase di $\frac{1}{4}$, nasce un campo magnetico di costante intensità che ruota con una velocità angolare $\omega = \frac{2\pi}{T}$; ossia la rotazione del campo risultante ha il medesimo periodo delle correnti sinusoidali adoperate per ottenerlo.

È facile vedere che se si inverte il senso di una delle correnti, ciò che equivale ad aggiungere la frazione $\frac{1}{2}$ alla fase, la rotazione si effettua in senso inverso.

Se adesso dal caso fittizio di un unico polo di calamita, passiamo al caso reale che nel centro dei

due quadri si trovi una piccola calamita dotata di due poli di nome contrario, e la supponiamo sospesa liberamente su un pernio, il campo magnetico così generato eserciterà su ciascun polo una forza eguale e di senso contrario; queste due forze tenderanno a condurre e a mantenere l'asse della calamita nella direzione del campo rotante; cosicchè la calamita ruoterà nel medesimo verso, e tenderà ad acquistare la medesima velocità. Tale è il principio degli *alterno-motori polifasi sincroni*, ossia dei motori elettrici messi in azione da correnti alternate simultanee eguali ma differenti per la fase.

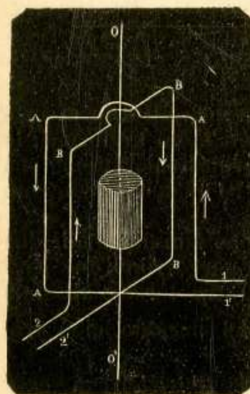


Fig. 529.

Nell'esempio precedente non si avevano che due correnti spostate di fase di $\frac{1}{4}$ l'una rispetto all'altra: ma si può utilizzare nella pratica un maggior numero di correnti di fasi differenti, tre, quattro, e qualche volta sei, ecc., per costruire degli alterno-motori *trifasi, tetrafasi, esafasi* e in generale *polifasi*.

Poniamo ora nel centro un cilindro cavo di rame, chiuso alle basi, e girevole intorno all'asse comune de' due rocchetti (fig. 529): avremo con ciò uno *schema* del motore Ferraris, dal quale presero origine tutti gli altri che sono di poi entrati nelle industrie. Se la corrente passa per una sola spirale, il cilindro sta fermo; ma appena le due correnti

spostate di fase le attraversano entrambe, il cilindro si mette a ruotare intorno al proprio asse, e la rotazione può accadere ne' due sensi. Nel cilindro di rame si generano delle correnti indotte, ed esso gira come in una esperienza analoga d'induzione fa un disco di rame intorno a un asse, per la rotazione di una calamita.

137. **Motore trifase sincrono ed asincrono.** — Il motore trifase consta di una triplice serie di rocchetti simile a quella del generatore, la quale riceve la corrente trifase. Ora, se l'organo mobile (rotore) consiste in una ruota di poli elettromagnetici eccitati da una corrente continua, e se essa è simile all'induttore del generatore, si avrà un *motore trifase sincrono*: per questi motori valgono le stesse considerazioni che per quelli monofasi. Se invece la parte mobile è costituita da quadri conduttori riuniti in modo da formare un circuito chiuso, la macchina è un *motore trifase asincrono*. V'ha poi interesse a produrre l'induzione in seno al mezzo più permeabile all'azione magnetica, che è il ferro: in questo dunque, analogamente alle generatrici, debbono disporsi i conduttori destinati a essere la sede della forza elettromotrice indotta. Quanto alla loro direzione, ricordiamo che la condizione per il massimo di forza elettromotrice indotta è che il conduttore tagli normalmente le linee di forza magnetica, con una velocità perpendicolare alla sua propria direzione ed a quella del campo; vale a dire, la direzione più favorevole per ottenere il massimo di corrente indotta è quella delle generatrici del cilindro rotante.

L'organo mobile dell'alternatore asincrono deve dunque essere formato da sbarre di rame parallele all'asse, equidistanti, vicine il più possibile alla superficie, cioè all'intraferro. Esse sono metallicamente

riunite all'estremità in modo da costituire un sistema di quadri equidistanti sopra un asse comune (fig. 530), con che rammentano una *gabbia da scoiattolo*, dalla quale cosifatti alternomotori prendono il nome. E per aumentare l'induzione, s'introducono i conduttori di rame in altrettanti canali praticati in una pila di dischi di ferro.

La forza elettromotrice indotta dal campo rotante che taglia continuamente questi conduttori paralleli all'asse, dà origine a correnti; e dalla loro azione elettromagnetica l'armatura è sollecitata a rotare.

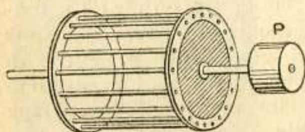


Fig. 530.

438. **Trasporto di energia con correnti alternate.** — Il primo celebre trasporto di energia per mezzo di correnti alternate fu quello tra Lauffen e Francoforte. A Lauffen una turbina di 300 cavalli metteva in moto un alternatore a due fasi (fig. 433): la forza elettromotrice della dinamo era di 150 volta, ma le due correnti erano elevate con due trasformatori al potenziale di 20000 volta (§ 432), cosicchè potevano essere condotte a Francoforte con fili di rame di 3^{mm} bene isolati. Le correnti a così alti potenziali erano di nuovo all'arrivo trasformate in correnti a 100 volta; esse servivano alla illuminazione; e inoltre, avendo la voluta differenza di fase, mettevano in moto un motore Ferraris a campo girevole, il quale serviva a muovere una pompa, e ad alimentare una piccola cascata. La perdita fu appena del 25 per 100.

Ora gli impianti pel trasporto di energia con le correnti alternate sono innumerevoli, e destano meraviglia per la grandiosità e la regolarità del

funzionamento. Sono migliaia e migliaia di cavalli vapore che in tutto il mondo sono così trasportati dalle cascate de' fiumi nei centri industriali, dove il lavoro si moltiplica ogni giorno più.

439. **Telefono; microfono; trasmissione telefonica.** — Anche il *telefono* ci offre un bell'esempio dell'invertibilità degli apparecchi magnetoelettrici.

Il telefono del Bell è rappresentato in sezione longitudinale dalla fig. 531; un rocchetto *B* di sottile filo di rame isolato si avvolge all'estremità di una sbarra calamitata *A*, e i suoi capi comunicano

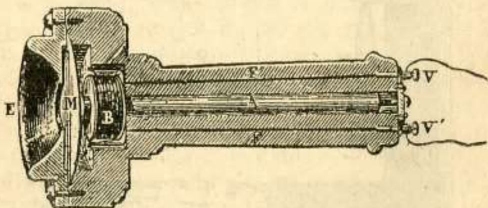


Fig. 531.

per mezzo dei fili *F*, *F'* con i serrafili *V*, *V'* Di fronte al rocchetto, e a piccola distanza, si trova una lamina sottile di ferro *M*, tenuta a posto da un imbuto contro il quale si applica l'orecchio.

Supponiamo ora di congiungere due telefoni con due fili; essi serviranno indifferentemente a trasmettere e a ricevere. Parlando difatti davanti all'imbuto del primo, ogni movimento periodico della lamina di ferro, modificando la calamitazione della sbarra calamitata, fa variare il flusso che attraversa il piccolo rocchetto; le correnti indotte che ne risultano, modificano alla lor volta, collo stesso ritmo, la magnetizzazione della calamita nel secondo

apparecchio, e determinano nella lamina di ferro di questo che le fa da àncora, dei movimenti identici a quelli dell'altra lamina, onde il suono è fedelmente ripetuto. In realtà i due apparecchi, trasmettitore e ricevitore, costituiscono due macchine a correnti alternative identiche, di cui la prima funziona come generatrice e la seconda come ricevitrice.

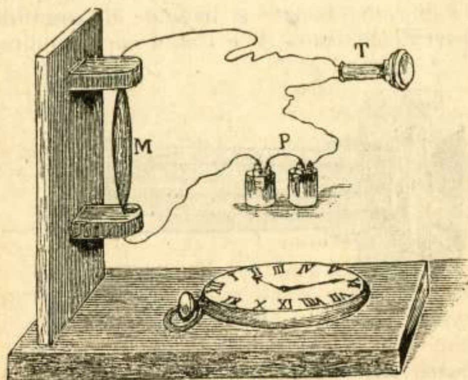


Fig. 532.

Se un telefono poi fa parte del circuito di una pila, ogni qualvolta varierà la resistenza, varierà anche l'intensità della corrente, e con essa la calamitazione della sbarra di acciaio; cosicchè la lamina *M* sarà più o meno attratta.

Allo scopo di far variare periodicamente la intensità della corrente, si ricorre al *microfono* di Hughes. Nella forma sua più semplice, consiste esso in un'asserella di legno verticale che porta due

pezzi di carbone, ai quali si appoggia, con leggero contatto alle estremità, un piccolo fuso *M* pure di carbone. Supponiamo che il microfono e il telefono *T* facciano parte entrambi del circuito di una pila *P*, come è indicato dalla fig. 532. Se allora si posa un orologio, per esempio, sulla base del microfono, o si canterà, si parlerà dinanzi all'istrumento, le vibrazioni del legno si comunicheranno al fuso *M*, e nei punti di contatto ne risulteranno tali variazioni di resistenza, e quindi di intensità della corrente, che la laminetta di ferro del telefono si porrà a vibrare con lo stesso ritmo.

Così possono trasmettersi a notevole distanza i vari suoni, ed anche la parola: anzi le vibrazioni della lamina del telefono possono riuscire ben più ampie di quelle dell'asserella del microfono, cosicchè si rendono con sorpresa udibili suoni e rumori debolissimi, come per es., il passo di una mosca. Se la distanza è grande, bisogna inserire il microfono colla pila nel primario di un piccolo trasformatore, mentre il telefono è unito ai termini del secondario.

Oggi funzionano egregiamente trasmettitori a grandi distanze, come, per esempio, tra Milano e Parigi, Milano e Roma, ecc. È necessario a tal fine di impiegare nella linea rame e non ferro; e di servirsi pel ritorno non già della terra, ma di un altro filo, avendo cura di disporli in modo da annullare l'effetto delle azioni induttrici esterne.

CAPITOLO XVII.

Telegrafia senza fili.

440. **Telegrafo senza fili del Marconi.** — Non possiamo fare a meno di dire poche parole di questa genialissima invenzione. Abbiamo notato (§ 334), che la scarica esplosiva fra le due sfere di uno spinterometro, se sono soddisfatte certe condizioni, è oscillatoria; vale a dire, nel tempo brevissimo della scintilla, la scarica si fa più volte alternativamente nei due sensi, variando in corrispondenza il segno dei potenziali sulle sferette.

Ora è bene sapere che Hertz ha dimostrato, che tali vibrazioni elettriche suscitano nel mezzo ambiente onde elettromagnetiche, le quali si propagano con la stessa velocità della luce, e come questa si riflettono, si rifrangono, ecc. Vale a dire, tra codeste onde e quelle della luce non v'ha altra differenza che la lunghezza loro, essendo le onde hertziane (così esse sono dette) molto più lunghe di quelle luminose.

V'hanno parecchi mezzi che servono a rivelare la propagazione delle onde hertziane; il primo usato, in ordine di tempo, è il *coherer*, che fu prima studiato dal Calzecchi, poi dal Branly e dal Lodge: esso è un vero *occhio elettrico* per tali onde.

Consiste il coherer, nella sua forma rudimentale, in un piccolo tubo di vetro contenente della limatura di nichel, di argento o di alluminio, chiuso alle estremità da due tappi, attraverso i quali passano due fili di rame; questi, senza toccarsi, stanno in contatto colla polvere metallica contenuta nel tubo stesso. Il coherer del Marconi (fig. 533) è formato da un tubetto di vetro di tre o quattro millimetri di diametro, nel quale sono due piccoli cilindretti di argento che funzionano da elettrodi, separati da un intervallo di un mezzo millimetro, e comunicanti con l'esterno per mezzo di due fili di platino. Nella interruzione trovasi un miscuglio di

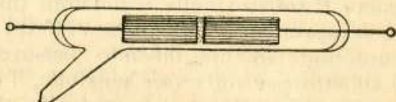


Fig. 533.

limatura di 96 parti di nichel per 4 parti di argento, con qualche traccia di mercurio: i granuli, di media grossezza, non sono stipati tra i due elettrodi, ma hanno una certa libertà di movimento. Ad evitare poi una prolungata ossidazione al contatto dell'aria, la quale avrebbe una influenza sulla regolarità del coherer, si fa il vuoto nel tubo per mezzo di un'appendice, e si chiude alla lampada. Tali tubetti oppongono, in condizioni normali, una resistenza tanto grande al passaggio della corrente, che intercalati nel circuito di una pila e di un galvanometro, non lasciano passare alcuna corrente, ovvero una debolissima.

Ma la loro resistenza elettrica diminuisce grandemente appena sono colpiti da un'onda elettrica:

le particelle metalliche contenute nel tubo allora si assestano, avviene fra esse un contatto più intimo, e la corrente passa, e può produrre effetti sensibili, come deviare l'ago di un galvanometro, magnetizzare il nucleo di un elettromagnete, ecc. Una volta subita l'azione dell'onda elettrica, la polvere rimane conduttrice e quindi non è più pronta a rivelare nuove onde; ma basta dare al tubo un piccolo urto, affinchè le cose tornino allo stato primitivo, cessi cioè l'orientazione delle particelle metalliche: la resistenza divenendo di nuovo grandissima, la corrente della pila torna ad essere trascurabile. Così il tubo è pronto a funzionare di nuovo per una nuova onda; e va da sè che un nuovo colpo riporta il tubetto nelle condizioni iniziali.

È facile comprendere come questo effetto si possa ottenere automaticamente, facendo passare la corrente del tubetto per un *relais* sensibile, il quale ad ogni onda chiuda il circuito di una pila più forte; in questo secondo circuito si inserisce un campanello elettrico, disposto in guisa che il martelletto batta direttamente il coherer nel suo punto di mezzo, o il sostegno che lo porta. Non sarebbe possibile disporre in uno stesso circuito il coherer e il campanello, perchè questo per agire ha d'uopo sempre della stessa corrente e abbastanza intensa, mentre la corrente del tubo varia al variare dell'intensità dell'onda elettrica ricevuta, e inoltre è molto debole.

In possesso di un ricevitore così sensibile e comodo, le cui indicazioni sono tradotte in colpi del martelletto, si possono assai bene, e con relativa facilità, studiare le proprietà delle onde elettriche. Adoperando un oscillatore formato semplicemente dalle due sferette connesse alle asticine di uno spinterometro, si vedrà agire questo nuovo ricevitore anche con scintille di qualche frazione di milli-

metro; e ad ogni interruzione del circuito del rocchetto eccitatore si sente benissimo il colpo del martelletto, anche quando il coherer è a qualche diecina di metri dal vibratore, ciò che prova l'estrema sensibilità del detto ricevitore.

Nella primavera dell'anno 1897 si divulgò rapidamente la notizia di esperimenti eseguiti a Londra sulla telegrafia senza fili, dal giovine italiano Guglielmo Marconi. Gli stessi esperimenti venivano poco dopo dal Marconi ripetuti in Italia, a Roma ed alla Spezia.

Il metodo del Marconi è essenzialmente basato sugli effetti delle onde hertziane. Il suo primo apparecchio, il più semplice consta di due parti, il trasmettitore e il ricevitore. Il trasmettitore si compone di un ordinario rocchetto di Ruhmkorff, di un opportuno elettromotore per eccitarlo, di un tasto per le interruzioni della corrente primaria, e di un oscillatore del Righi, o di un comune spinterometro, a cui è aggiunta un'asta metallica. L'oscillatore del Righi è costituito da quattro sfere (fig. 534): le due di mezzo distano di uno o due millimetri e sono immerse in parte nell'olio di vaselina; le due estreme sono nell'aria ad una distanza di uno o due centimetri dalle altre. Riunendo queste ai poli di un rocchetto del Ruhmkorff, se le distanze sono convenienti, scoccano simultaneamente tre scintille, due nell'aria e una nell'olio di vaselina: quest'ultima sola è efficace per la produzione delle oscillazioni elettriche. L'olio di vaselina, oltre a mantenere sempre in condizioni appropriate le superficie delle sfere, permette di utilizzare una maggiore energia nella scarica, in grazia della maggiore resistenza che esso oppone alla scintilla.

Tutte le volte che abbassando il tasto *I* (fig. 534), si effettua il passaggio della corrente nel circuito

primario del rocchetto, le piccole sfere *R*, *R* si scaricano sulle sfere più grosse dell'oscillatore, le quali a loro volta si scaricano fra di loro. La scintilla brillante che avviene fra queste ultime, è formata da oscillazioni elettriche rapidissime. Marconi

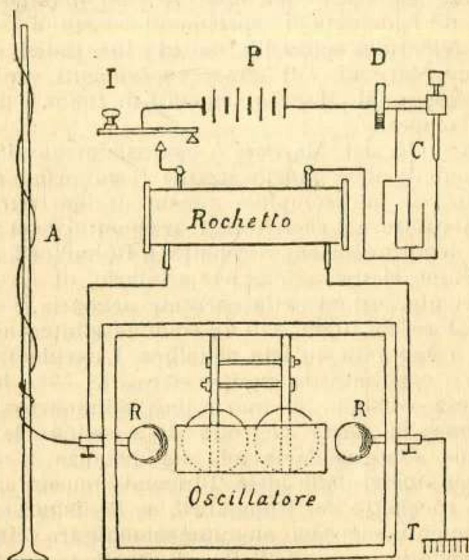


Fig. 534.

ha aggiunto a questo trasmettitore un'antenna metallica verticale, tanto più alta quanto maggiore è la distanza a cui si vuol trasmettere i segnali. La figura mostra inoltre il rocchetto di Ruhmkorff, nel quale può essere lanciata la corrente degli accumulatori *P* abbassando il tasto *I*, e il con-

densatore *C* che aumenta l'efficacia della scarica. Le sferette *R*, *R*, le sfere centrali e l'antenna costituiscono propriamente l'oscillatore; ogni cosa è sostenuta da un telaio di ebanite, e mentre un elettrodo è in comunicazione col filo verticale o antenna *A*, l'altro elettrodo è in comunicazione colla terra *T*. Questa comunicazione colla terra è necessaria quando si vogliono mandar segnali a grandi distanze; per piccole distanze, esperienze da corso, se ne può fare a meno.

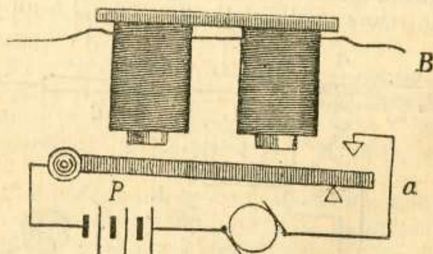


Fig. 535.

Il ricevitore poi di questo sistema telegrafico comprende due batterie di pile a secco, un *relais*, un campanello elettrico, un apparato ordinario Morse, un tubetto sensibile (coherer) perfezionato dal Marconi, alcune resistenze di fili metallici, e finalmente un'antenna metallica verticale eguale a quella del trasmettitore.

Si costruiscono *relais* di forme diverse: uno dei più semplici è quello della fig. 535; consiste in un'elettrocalamita a ferro di cavallo e in un'ancoretta *a* mobile attorno ad un pernio. Quest'ancoretta è vicina ai nuclei dell'elettrocalamita, e però,

quando questi si magnetizzano pel passaggio di una corrente, essa viene sollevata. In tale sollevamento va a toccare una punta e chiude il circuito di una pila *P*, la cui corrente può far muovere una macchina adatta, per esempio, un apparato Morse.

Ciò premesso, vediamo come possano disporsi le cose, affinchè per ogni onda inviata dal vibratore che incontra il coherer, corrisponda una segnalazione dell'apparecchio telegrafico Morse. Formiamo a tal uopo un circuito come quello della fig. 536: *B* è un cohe-

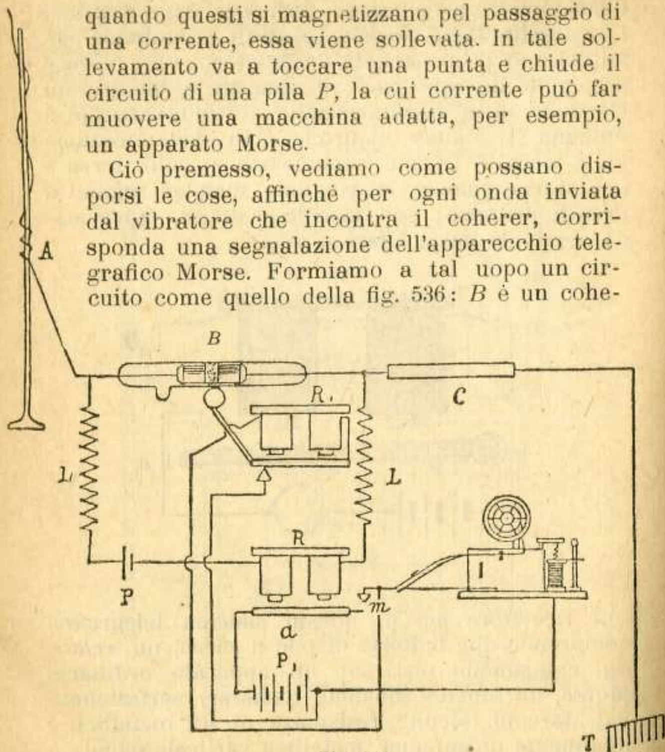


Fig. 536

rer del Marconi, consistente in un tubetto chiuso e vuotato d'aria, con due cilindretti di argento che fanno da elettrodi, comprendenti fra essi pochi grani di limatura di argento e di nichel. Il coherer è nel circuito della pila *P* insieme

al relais *R*, munito della sua piccola ancora *a*. La corrente non passerà pel coherer finchè esso non è colpito da un'onda elettrica: quando ciò avviene, la corrente passa, l'elettrocalamita attira l'ancoretta che sollevandosi chiude in *m* il circuito della pila P_1, la cui corrente agisce sull'apparecchio telegrafico Morse *M* per tutto il tempo che il contatto in *m* si mantiene, e l'apparato emette un segnale. Oltre a questo secondo circuito ve n'ha un terzo alimentato dalla stessa pila P_1, il quale contiene un motorino elettrico R_1, incaricato di battere sul tubetto un leggero colpo per ogni onda ricevuta.

Il filo conduttore verticale *A* è unito ad uno degli estremi del tubetto sensibile, mentre l'altro estremo è connesso con un conduttore *C* che serve ad aumentare la capacità del sistema, e con la terra.

Oltre agli organi descritti, si vedono nella figura le due resistenze autoinduttive *L*, L_1 consistenti in spiraline, le quali impediscono che le onde elettriche passino al di fuori del tubetto.

Riepilogando, la trasmissione si effettua così: abbassando il tasto *I* (fig. 534), la corrente passa nel primario del rocchetto, e scocca una serie di scintille tra le sfere dell'oscillatore, originandosi così le onde elettromagnetiche che l'antenna irradia, e si propagano nell'etere con la velocità della luce. Ogni volta che si abbassa il tasto, si ripete questo fatto. Ora per ogni onda che arriva al ricevitore, l'antenna di questa e le parti con lei connesse diventano sedi di azioni elettriche; il tubetto sensibile diviene conduttore, e lascia passare la corrente della pila *P* inserita nel suo circuito (fig. 536); il relais chiude il secondo circuito della pila P_1, e l'apparato Morse dà un segnale, nel mentre il martelletto comandato

dal relativo elettromotore R_1, colpendo il tubetto, lo rende atto a ricevere un nuovo segnale. Abbassando il tasto soltanto per un istante, la Morse segna un punto; per una successione rapida di onde, in grazia dell'inerzia dell'apparato Morse, invece di una serie di punti si ha una linea. Si possono così spedire e ricevere dispacci.

Nella descrizione precedente si è supposto, per maggiore semplicità, che una delle antenne (quella della posta trasmettitrice) inviasse delle onde senza riceverne, e che l'altra antenna (quella della posta ricevitrice) ne ricevesse senza emetterne; ma nella pratica ogni stazione deve poter disimpegnare l'ufficio di trasmettere e ricevere, cosicchè la medesima antenna deve servire alla trasmissione e al ricevimento. Pertanto ciascuna stazione deve avere l'apparecchio per trasmettere e quello per ricevere, che saranno tutti e due messi in comunicazione con l'antenna al momento voluto. A tal uopo la leva del manipolatore di Morse si prolunga dall'altra parte del fulcro con un'asta di ebanite, la cui estremità è munita di una vite metallica comunicante con l'antenna (fig. 537) per mezzo di uno dei poli dell'oscillatore *E*. Nella posizione di riposo la detta vite appoggia su un bottone metallico unito con un filo a un elettrodo del coherer: questo dunque funzionerà se le onde perveranno all'antenna. Durante la trasmissione, la comunicazione del ricevitore con l'antenna è interrotta perchè il tasto viene abbassato, e invece si chiude il circuito della macchina di Ruhmkorff *I B*, e l'oscillatore funziona. Se poi si risolleva il tasto, cosicchè questo prenda di nuovo la posizione di riposo, si ristabilisce la comunicazione dell'antenna col ricevitore.

Sono le due antenne metalliche aggiunte al ricevitore e all'oscillatore che hanno permesso di rag-

giungere grandi distanze: inoltre si ammira una grande perfezione in ogni parte dell'apparecchio. Con l'antenna, l'oscillatore del Marconi diventa dissimmetrico, tuttavia esso si comporta come un

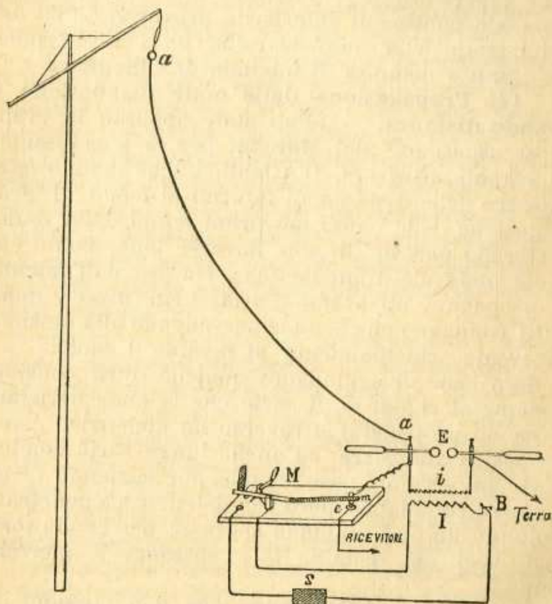


Fig. 537.

oscillatore hertziano; la capacità ne viene aumentata e di conseguenza allungata l'onda, ma la natura dell'azione non varia. La lunghezza d'onda è circa quattro volte quella dell'antenna, e così l'oscillazione è sensibilmente concorde in tutti punti; se fosse

altrimenti, si avrebbero nei diversi punti oscillazioni in opposizione di fase, che evidentemente tenderebbero a produrre effetti opposti nei luoghi lontani dal campo.

Le esperienze del Marconi, fatte sul mare, ancora con continenti interposti, provarono, fino dai primi tempi della radiotelegrafia, che la trasmissione può farsi a distanza di migliaia di chilometri.

141. **Propagazione delle onde magnetiche a grande distanza.** — Sono state appunto le grandiose esperienze del Marconi per la trasmissione di segnali attraverso l'Atlantico, che hanno fatto nascere delle discussioni intorno al modo di propagazione delle onde: nei primi tempi della radiotelegrafia pareva di non doversi tener conto che delle onde elettromagnetiche emesse dall'antenna e propagate attraverso l'aria; oggi invece quasi tutti ritengono che le onde pervengano alla stazione ricevente principalmente attraverso il suolo.

Sarà bene di aggiungere qualche altra considerazione al riguardo. È certo che le onde hertziane possono propagarsi attraverso un dielettrico com'è la nostra atmosfera, ed anche lungo corpi conduttori. Nel secondo caso le onde, pur seguendo i conduttori, rimangono però nel dielettrico, e penetrano soltanto fino ad un tenue spessore nel conduttore: nel caso de' metalli, tale spessore è piccolissimo.

Che le onde elettromagnetiche non possano penetrare nei metalli, e quindi nell'interno di un involucro metallico ermeticamente chiuso da ogni parte, fu dimostrato in modo evidente dal Righi. Si può provare la cosa con una facile esperienza, ponendo nell'interno di un involucro metallico interamente chiuso una pila con un coherer e un campanello elettrico; facendo agire un oscillatore

anche potente in vicinanza, non si riesce mai ad eccitare il coherer, e il campanello tace.

Nel caso poi di corpi semi-conduttori, come possono considerarsi la crosta terrestre e i mari, le onde saranno ancora in parte guidate da essi, e vi penetreranno più profondamente di quello che farebbero nei metalli.

Sembra quindi non potersi fare a meno di ammettere che le onde si propagano, in pari tempo, attraverso il mare e la terra e attraverso l'atmosfera, per modo che esse seguano la curvatura del globo. Si spiega così, anche indipendentemente dalla diffrazione, dal ripiegamento cioè delle onde dietro agli ostacoli che ne impediscono la libera propagazione, la possibilità che le onde emesse da una stazione raggiungano un' altra tanto lontana, che sia interposto fra esse un grande arco della superficie terrestre.

A provare che le onde elettromagnetiche possano essere trasmesse semplicemente dall'aria, stanno le esperienze di radiotelegrafia fatte in pallone; e, d'altra parte, esperienze dirette hanno provato che le onde si propagano anche per mezzo dell'acqua e del suolo. Sembra quindi doversi ritenere che, mentre l'antenna colle sue oscillazioni elettriche genera delle onde elettromagnetiche che si propagano nell'aria in ogni senso, la sua comunicazione col suolo nella parte inferiore imprime alla terra oscillazioni elettriche di uguale periodo propagantesi pure in ogni senso attorno al punto in cui la propagazione è stabilita, ma specialmente nelle parti superficiali del suolo.

112. **Sintonizzazione; importanza del problema.** — Le onde hertziane si propagano in ogni direzione; esse possono dunque impressionare tutti i rivelatori posti nel raggio efficace di trasmissione,

uniti ad antenne eguali e anche minori. Ogni stazione improvvisata nel raggio d'azione della posta di trasmissione può essere in grado di sorprendere le comunicazioni: possono servire da antenna fili telegrafici, fili delle correnti d'illuminazione, aste di parafulmini, ecc., i quali conduttori sono detti *antenne di fortuna.* Per conseguenza è impossibile con i metodi descritti di mantenere il segreto delle trasmissioni; il che costituisce un grave inconveniente. E quel che è peggio, può anche accadere che altri oscillatori agenti in quella zona, turbino con le loro onde la comunicazione, producendo nei segnali ricevuti una confusione inestricabile. Si intende subito pertanto che il valore pratico della telegrafia senza fili sarebbe stato bene scarso, se non si fosse potuto ovviare, almeno in parte, a tale incoveniente.

Ciò che occorre è, che ciascuna emissione di onde fatta da una data stazione, produca il suo effetto soltanto in un'altra determinata fra le tante stazioni ricevitrici. Per risolvere questo problema è necessario che le onde elettriche generate alla stazione trasmittente sieno poco ammorzate, la frequenza essendo scelta a piacere; e che la stazione ricevitrice sia influenzata da queste onde solamente, rimanendo insensibile alle onde aventi un periodo abbastanza diverso. In altre parole, occorre che fra i due apparecchi trasmettitore e ricevitore delle onde vi sia *sintonia,* accordo cioè del periodo di vibrazione.

A tale intento sono stati proposti vari procedimenti, diretti a imitare, per quanto è possibile, il fenomeno della risonanza acustica. Sappiamo che un corpo elastico, posto in vicinanza di un corpo sonoro, può entrare esso stesso in vibrazione: e tali vibrazioni diventano ben ampie e intense, se c'è

accordo tra i periodi dei due corpi, e sono invece debolissime per poco che i periodi sieno diversi. Se si potessero ottenere gli stessi risultati con le vibrazioni elettriche, il problema sarebbe risoluto, poichè potrebbero sovrapporsi, senza danno, segnali di periodo differente, ciascun ricevitore rispondendo soltanto a quello col quale è accordato. Ma disgraziatamente si oppongono a tale soluzione grandi difficoltà: il fenomeno di risonanza elettrica, a cagione del rapido smorzamento delle oscillazioni eccitatrici, differisce molto da quello acustico. I risonatori di Hertz, e lo stesso dicasi delle antenne del telegrafo Marconi, rispondono senza dubbio meglio se sono accordati; ma vibrano anche, sebbene meno intensamente, quando si scostano dall'unisono. Siccome poi il coherer e gli altri rivelatori hanno una sensibilità estrema, e bastano a impressionarli delle eccitazioni debolissime, così essi rispondono a tutti gli impulsi, forti o deboli che siano, purchè raggiungano un certo limite.

Lo smorzamento delle oscillazioni nel sistema primitivo di radiotelegrafia ora descritto è così rapido, che il Tissot, analizzando la scintilla con uno specchio girante, non ha potuto vedere più di tre imagini; il che vuol dire che alla fine di tre vibrazioni le oscillazioni sono divenute insensibili: dunque all'antenna ricevente, invece di una serie di impulsi periodici, arrivano due o tre onde, e l'antenna entra in vibrazione col periodo proprio, come vibrerebbe un'asta metallica percossa con un martello.

Un trasmettitore che consista semplicemente in un conduttore verticale, non è dunque un oscillatore persistente. La sua capacità elettrica è relativamente così piccola, e la sua attitudine a irradiare così grande, che le oscillazioni si spengono subito,

e ricevitori di periodo anche sensibilmente diverso rispondono ed entrano in azione.

Su questo punto non v'è alcun dubbio, e l'esperienza conferma le vedute teoriche. Ma se la stessa quantità di energia potesse essere distribuita in un *gran numero* di impulsi individuali deboli, vale a dire se le oscillazioni si andassero spegnendo con relativa lentezza, il loro effetto potrebbe essere utilizzato soltanto da un risonatore accordato con la loro particolare frequenza. Questo allora non risponderà alle prime due o tre oscillazioni, ma soltanto ad una più lunga successione di impulsi ritmici; e solo dopo un'accumulazione di parecchi impulsi, l'amplitudine dell'oscillazione nel circuito produrrà una forza elettromotrice sufficiente a rompere l'isolamento del coherer, e a fornire un segnale atto ad essere registrato. Un ricevitore invece non accordato, è incapace di sommare gli impulsi successivi, e non risponderà, a meno che, essendo molto vicino all'oscillatore, basti soltanto il primo impulso a farlo agire.

Ora noi sappiamo che, per produrre oscillazioni poco ammorzate, occorre un circuito chiuso; allora l'irraggiamento diminuisce, l'energia si conserva più a lungo, e le oscillazioni si spengono lentamente. Ma d'altra parte non è possibile rinunciare all'antenna come mezzo di irradiare nello spazio l'energia dell'eccitatore: per soddisfare a queste diverse condizioni, è evidente che bisogna combinare un eccitatore chiuso che produca le oscillazioni, e un'antenna che serva a diffonderle nello spazio. E questo è ciò che ha fatto il Marconi.

443. **Sistema Marconi di radiotelegrafia sintonica.** — Il nuovo trasmettitore del Marconi è costituito da un eccitatore primario e da un apparecchio secondario (fig. 538); l'eccitatore primario

è formato da una batteria *K* di bottiglie di Leida riunite in quantità, le cui armature comunicano colle due sfere dell'eccitatore *O*, attraverso al primario *P* di un trasformatore. Le due sfere poi dell'eccitatore sono unite ai poli di un rocchetto di induzione *B*, o di altro trasformatore ad alto po-

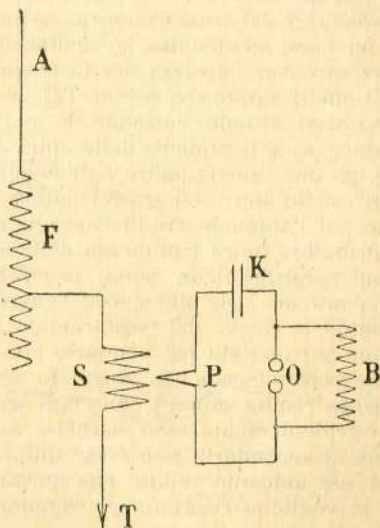


Fig. 538.

tenziale. Il circuito raggiante si compone dell'antenna *A*, di un'induttanza variabile *F*, del secondario *S* del trasformatore che all'altra estremità è riunito al suolo *T*. Osserveremo che l'eccitatore *KOP* è pressochè chiuso, e però atto a produrre oscillazioni poco smorzate. La scarica in *O* risulta

oscillatoria, essendo opportunamente scelte la capacità e l'autoinduzione del circuito primario, e le oscillazioni si trasmettono all'antenna per induzione *(connessione magnetica)*.

Ciò che importa è di stabilire l'accordo tra il circuito oscillante *K O P* e il circuito secondario formato dall'antenna (aereo), dall'induttanza *F* e dal secondario *S* del trasformatore. Se questa condizione non fosse soddisfatta, le oscillazioni dei due conduttori sarebbero diverse per la frequenza e la fase, e gli effetti sarebbero deboli. Tale accordo tra i due circuiti si ottiene variando la capacità del condensatore *K*, e il numero delle spire dell'induttanza *F*; si può anche agire sull'avvolgimento e sul numero delle spire del trasformatore.

Sebbene poi l'antenna irradii l'energia che riceve dal trasformatore, pure l'ampiezza delle successive oscillazioni persiste alcun poco; perocchè, a misura che l'antenna cede allo spazio l'energia per irraggiamento, ne riceve dal trasformatore, finchè la provvisione accumulata nel primario non sia esaurita; il che però succede ben presto. In ogni caso lo smorzamento risulta minore che cogli ordinari apparecchi; evidentemente esso sarebbe ancora più piccolo, se al secondario non fosse unita l'antenna raggiante; ma abbiamo veduto che questa è necessaria, se si vogliono raggiungere ragguardevoli distanze.

Passiamo ora a occuparci dell'apparato ricevitore: qui è disposto l'aereo *A* connesso colla terra a - traverso ad un'induttanza variabile *F*, e al primario *P* di un trasformatore che si trova alla base dell'antenna, in un punto che è un ventre di intensità per la corrente (fig. 539). Il secondario del trasformatore è diviso in due parti identiche *S* e *S'*, le cui estremità contigue sono unite alle due armature

di un piccolo condensatore *K*, mentre le estremità più lontane terminano agli elettrodi del coherer *C*. Il circuito della pila *P* e del soccorritore *R* è a sua volta collegato all'estremità contigue del secondario *S S'* col mezzo di due rocchetti d'impedenza

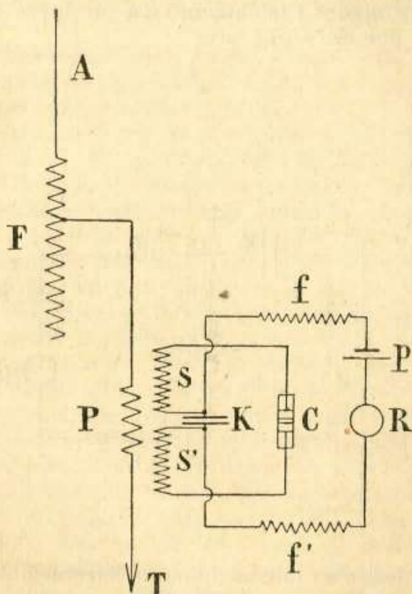


Fig. 539.

f,*f'*. Per ottenere i migliori risultati è necessario che il periodo delle oscillazioni elettriche del conduttore formato dall'aereo *A* e dal primario *P* del trasformatore con la relativa connessione a terra, sia in consonanza elettrica, non solo con la posta trasmittente, ma anche col circuito *S S' K C* for-

mato dal secondario del trasformatore stesso e dal relativo condensatore. Così, al sopraggiungere di una serie di deboli ma intonati impulsi, l'effetto si accumula nel condensatore, fino a che la forza elettromotrice ai morsetti del detector sia sufficiente a rompere l'isolamento e a produrre un segnale da potersi registrare.

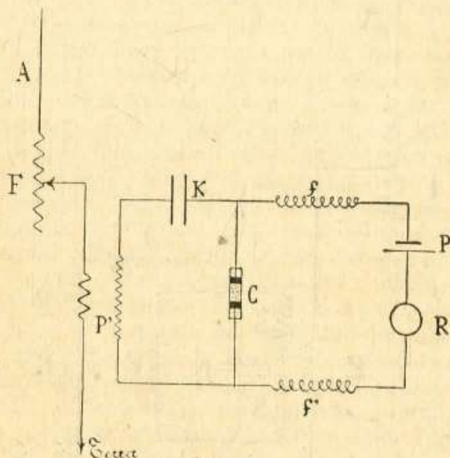


Fig. 540.

Concludendo su tale argomento, l'accordo perfetto fra il trasmettitore e il ricevitore descritti, avviene quando i prodotti delle capacità e induttanze dei quattro circuiti che li costituiscono, sono eguali.

Appena il coherer è divenuto conduttore, la corrente della pila P percorre il circuito $fSCS'f'R$ comprendente il coherer, il relais R, i rocchetti di autoinduzione f, f', e quelli S, S' del secondario del trasformatore: è evidente difatti che tale corrente,

essendo continua, non può attraversare il condensatore, e non passerà quindi che al momento in cui il coherer diventa conduttore per le oscillazioni hertziane. D'altro canto, rocchetti di autoinduzione f, f', mentre offrono una debole resistenza alle correnti continue, arrestano le correnti alternative rapide; onde accadrà che essi, mentre danno facile passaggio alla corrente della pila, arresteranno le dette oscillazioni, impedendo loro di perdersi nel circuito della pila locale.

Un'altra disposizione poco diversa di una posta ricevente è quella indicata dalla fig. 540, che dopo le cose dette non ha bisogno di ulteriori spiegazioni.

444. **Osservazioni sulla sintonia elettrica.** — Per una perfetta sintonia farebbe d'uopo che un ricevitore sensibile alle onde di un determinato periodo, fosse del tutto incapace di sentire le onde di un periodo diverso. Ma se ciò non si verifica, a tutto rigore, neppure in acustica con le onde poco ammorzate, sarà molto più difficile che avvenga con le oscillazioni elettriche che si spengono tanto più rapidamente. Tuttavia un grande progresso su questa via si è compiuto, adottando tra le varie stazioni periodi di oscillazione ben diversi. — Notiamo poi che per la radiotelegrafia sintonica occorrono rivelatori delle onde capaci di sommare i successivi impulsi che ricevono. Il coherer non può servire all'uopo; esso è sensibile ai primi impulsi che hanno intensità maggiore, e non è capace di sommare i successivi. Non sì tosto un'onda di intensità sufficiente lo raggiunga, esso diviene conduttore; le successive onde sono senza effetto. Lo si è detto *occhio elettrico*, e difatti l'occhio fissando una sorgente di luce, non vede la sua intensità luminosa aumentare col tempo. La lastra fotografica invece accumula le azioni successive.

445. **Detector magnetico e altri rivelatori.** — Il detector magnetico scoperto dal Marconi è un rivelatore di onde elettromagnetiche molto sensibile e di funzionamento sicuro, non capriccioso come è il coherer. Esso si basa sul fenomeno d'isteresi del ferro in un campo magnetico variabile, per cui la sua intensità di magnetizzazione segue con ritardo le variazioni di intensità del campo.

Ora accade che se un 'onda elettromagnetica arriva a influenzare il ferro, mentre è soggetto al-

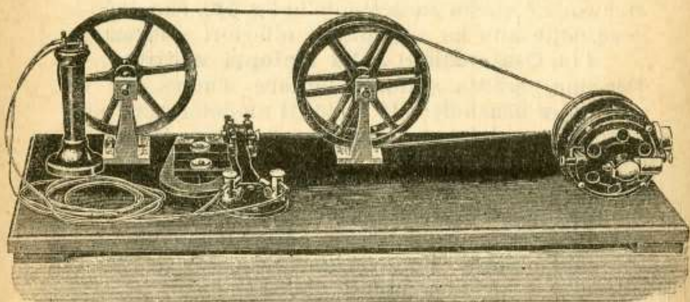


Fig. 541.

l'azione di un campo variabile, la sua isteresi varia bruscamente; e se intorno ad esso è avvolto a spire un reoforo, la variazione brusca della magnetizzazione darà luogo a una corrente indotta che si renderà sensibile col mezzo di un telefono. Il detector del Marconi consiste in una disposizione simile a quella della fig. 541. Una cordicella di fili di ferro si avvolge come una fune senza fine su due carrucole, le quali son fatte girare piuttosto lentamente per mezzo di un motorino, o di un

congegno di orologeria: tale cordicella passa entro un rocchetto in prossimità d'un magnete fisso a ferro di cavallo, o meglio tra due calamite permanenti affacciate con i loro poli omonimi. Il rocchetto è unito per un capo all'antenna e per l'altro alla terra. Al disopra di questo avvolgimento primario ve n'ha un secondo isolato dal primo, fatto di un filo più lungo e sottile i cui capi sono congiunti a un telefono. Ora s'intende che una particella del ferro nel muoversi tra i poli delle calamite è soggetta a un campo variabile; e se, mentre questo accade, il rocchetto primario è investito dalle correnti oscillatorie raccolte dall'antenna, nascono nel secondario le correnti indotte che fanno vibrare la laminetta del telefono.

Non possiamo occuparci del *rivelatore elettrolitico*, ma vogliamo dire due parole dei *rivelatori a cristallo* e dei *rivelatori a gas ionizzato.*

446. **Rivelatori a cristallo.** — Questi sono fondati sulla proprietà particolare che hanno alcune sostanze cristallizzate (carborundum, pirite, ecc.) di acquistare sotto l'azione delle onde elettriche una conduttività unilaterale, in modo da funzionare come vere valvole elettriche o raddrizzatori di correnti oscillanti. La figura 542 mostra un cristallo di carborundum, che da una parte termina con una punta e dall'altra con un piano, e s'appoggia a due piani metallici *A*, *B* di ottone o di acciaio. Con *A* e *B* sono collegati un circuito contenente una pila *P* con un telefono *T*, e il circuito antenna-terra. L'esperienza prova che se una serie di correnti oscillanti investe l'antenna, il cristallo, per effetto della sua conduttività unilaterale, le trasforma in correnti pulsanti dello stesso verso che vengono avvertite al telefono.

Risultati analoghi si ottengono se, invece del car-

borundum, si adoperano contatti eterogenei formati da vari corpi cristallizzati (pirite, calcopirite, ga-

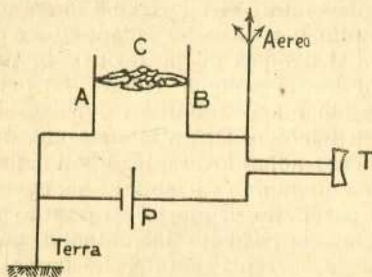


Fig. 542.

lena, zincite, ecc., ecc.) su cui s'appoggia una punta metallica con pressione regolabile. L'esperienza di-

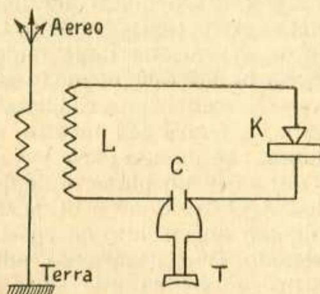


Fig. 543.

mostra pure che con questi cristalli ora nominati, il telefono accusa le stesse correnti anche senza l'intervento della pila *P*. La figura 543 mostra un

dispositivo semplice di recezione a cristallo senza forza elettromotrice estranea e a collegamento magnetico, nel quale il rivelatore a contatto solido *K* è inserito direttamente nel circuito oscillante *L C*, ed il telefono *T* si trova in derivazione sulla capacità.

I rivelatori a cristalli sono estremamente sensibili, ma facili a sregolarsi; bisogna in pratica aver pronti parecchi frammenti di cristalli, e cambiare per tentativi il luogo di contatto della punta.

447. **Rivelatori a gas ionizzato.** — Tali rivelatori sono fra i più interessanti nella tecnica radiotelegrafica, giacchè, oltre ad avere una grandissima sensibilità, sono ad effetto integrale, vale a dire utilizzano tutte le oscillazioni dell'onda incidente e non soltanto le prime più ampie. Inoltre sono di una notevole costanza e sicurezza di funzionamento, e quindi rispondono bene alle esigenze della pratica.

Questi rivelatori si basano sul fenomeno scoperto da Edison nel 1890, consistente nel fatto che il filamento di una lampadina ad incandescenza emette, quando è luminoso, dei corpuscoli elettrizzati negativamente, ossia elettroni negativi (fig. 544). Se quindi nell'interno della lampada si trova una lamina metallica *S*, questa raccoglie l'irradiazione elettronica del filamento *F* acceso, e lo spazio tra *F* ed *S* diviene ionizzato e perciò conduttore. Ora l'esperienza dimostra che questo spazio ionizzato possiede, analogamente a quanto avviene nei ricevitori a cristallo, una conduttività unilaterale; esso cioè, mentre ostacola il passaggio delle correnti dirette in un certo verso, favorisce quelle dirette in senso contrario, e precisamente quelle dirette dalla lamina al filamento, giacchè in tal caso il moto delle cariche negative proprie della corrente è cospirante col movimento

delle cariche negative emesse dal filamento. Tale spazio quindi, possedendo proprietà raddrizzatrici, funziona da valvola; e nel caso che faccia parte di un circuito ricevitore radiotelegrafico, permetterà il passaggio delle semionde di un dato segno e ostacolerà le altre. Si comprende inoltre come questi gruppi di onde così raddrizzati diano, in relazione alla loro frequenza per secondo, altrettanti impulsi alla laminetta del telefono seguiti da intervalli di riposo, e rendano possibile la percezione di segnali auditivi.

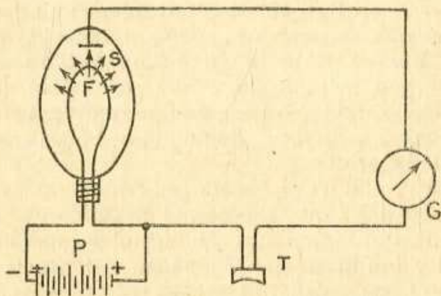


Fig. 544.

448. **Emissione a carattere musicale.** — La sostituzione, nella emissione, della scintilla musicale alla scintilla rada costituisce uno dei progressi notevoli della radiotelegrafia: si ha vantaggio tanto alla trasmissione che alla ricezione dei segnali. Teniamo presente che, a ciascuna scintilla che scocca tra le sfere dell'eccitatore, si produce un gruppo di onde di ampiezza rapidamente decrescente. e a ciascuna onda corrisponde un periodo dell'ordine del milionesimo di secondo. Supposto, per sempli-

cità, tale periodo di un milionesimo di secondo, a ciascun gruppo corrisponderà la durata di un centimillesimo di secondo, se le oscillazioni del gruppo sono dieci; questa dunque, in tale ipotesi, sarebbe la durata totale della scintilla oscillante. Ora supponiamo che l'eccitatore sia alimentato da un rocchetto di Ruhmkorff, e che questo sia munito di un buon interruttore che possa determinare cinquanta scintille per secondo: si vede subito che i gruppi d'onda forniti da ciascuna scintilla, sono separati da intervalli relativamente molto grandi, durante i quali le antenne, tanto quelle trasmittenti quanto quelle riceventi, sono *silenziose*.

Il fenomeno è rappresentato dal diagramma della fig. 545: dopo il primo gruppo d'onde $A_2 M_2$ che

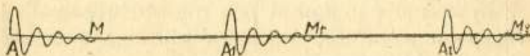


Fig. 545.

supporremo emesso nel tempo di dieci milionesimi di secondo, tutto rientra nella quiete durante un lungo intervallo di circa ventimila milionesimi, ossia un cinquantesimo di secondo; allora una nuova scintilla fornisce un nuovo gruppo di onde $A_1 M_1$; indi nuovo silenzio per un cinquantesimo di secondo ancora, fino a un nuovo gruppo d'oscillazione $A M$, e così di seguito.

Notiamo che il diagramma non è in giusta scala: le lunghezze $A M$, $A_1 M_1$ ... prese sull'asse dei tempi, valendo dieci milionesimi di secondo, e le lunghezze $M A_1$, $M_1 A_2$.... rappresentando ventimila di tali unità, si vede che questi ultimi segmenti dovrebbero, in realtà, essere immensamente maggiori.

Aumentando quindi la frequenza di successione

dei gruppi d'onda per dare ad essi un carattere musicale, i gruppi stessi vengono ad essere più ravvicinati, e quindi aumenta il rendimento della trasmissione perchè diminuiscono i periodi ne' quali l'antenna non viene utilizzata.

449. **Eccitazione ad impulso: metodo di Marconi col discolo rotante.** — Un altro grande progresso è stato raggiunto nella radiotelegrafia con l'applicazione del principio dell'*eccitazione smorzata o ad impulso,* detto principio del Wien.

Adoperando nella trasmissione le eccitazioni a collegamento magnetico del primario e del secondario, come indica la figura 538, si ottengono effetti diversi secondo il grado di accoppiamento dei due circuiti in presenza. Se esso è molto debole e se i due circuiti sono intonati, lo smorzamento è debole, e si è in buone condizioni per quanto riguarda la sintonia, ma poca energia passerebbe dal primario al secondario antenna-terra, cosicchè si avrebbe scarsa emissione di energia e cattiva utilizzazione.

Se, invece, si rende l'accoppiamento più intimo, allora accade che il secondario entrato in vibrazione elettrica, ricomunica l'energia al primario; da questo poi di nuovo l'energia passa al secondario, e così di seguito.

Tale scambio di energia fra il circuito oscillante primario e il circuito secondario antenna-terra, si può paragonare all'azione e reazione che ha luogo fra due pendoli A, B della stessa lunghezza capaci di vibrare per risonanza, ossia per comunicazione diretta o indiretta di energia.

Supponiamo i due pendoli sospesi ad un sostegno comune deformabile, per es. una funicella orizzontale tesa convenientemente, capace di effettuare la comunicazione dei movimenti da un pendolo all'altro. Dopo poche oscillazioni del pendolo A, che

rappresenta il primario dell'oscillatore radiotelegrafico, l'energia passerà quasi tutta in *B* che rappresenta il secondario o aereo; questo, oscillando a spese della energia del primo, ne fa diminuire l'ampiezza delle vibrazioni fino a spegnerle, e ciò costituisce il passaggio dell'energia o azione dal primario al secondario. Ma il pendolo *B* messo in oscillazione funziona alla sua volta da primario, e restituisce l'energia al pendolo *A* che comincia di nuovo ad oscillare (reazione del secondario sul primario), mentre le oscillazioni di *B* si spengono, ma per riattivarsi una seconda volta, e così via, coincidendo i massimi di oscillazione di un pendolo con i minimi dell'altro, secondo una legge espressa da una curva di battimenti.

Supponiamo ora che il circuito primario, dopo aver compiuto un piccolo numero di oscillazioni, tante quante ne occorrono affinchè la maggior parte della sua energia sia passata nel secondario, venga bruscamente interrotto, in guisa ch'esso non possa più oscillare. Allora non potranno più aver luogo nè la reazione del secondario sul primario, nè il conseguente ritorno di energia: in tal caso il secondario, ossia il circuito antenna-terra, non potendo comunicare ad altri l'energia ricevuta, vibrerà col periodo e con lo smorzamento che gli sono propri, ed emetterà una serie di onde pure, senza dar luogo alla coesistenza di due onde diverse e al fenomeno dei battimenti. E se l'antenna presenterà un piccolo smorzamento, in particolare se essa dissipa poca energia per l'effetto Joule, emetterà una serie di onde pure, a periodo ben determinato e a debole smorzamento, condizioni richieste per una buona sintonia.

L'essenza del principio di Wien consiste dunque nell'impedire, con acconcio artificio, che l'energia

ritorni dal secondario (antenna) al primario o circuito oscillante.

Il Marconi raggiunge tale effetto col metodo *meccanico* del deflagratore rotante a grandissima velocità, il quale fornisce scintille musicali di tonalità ben determinata.

L'apparecchio ha come parte principale un disco *D* (fig. 546) munito nella periferia di un certo numero di denti equidistanti, il quale ruota con grande velocità fra due elettrodi *M N* congiunti col circuito

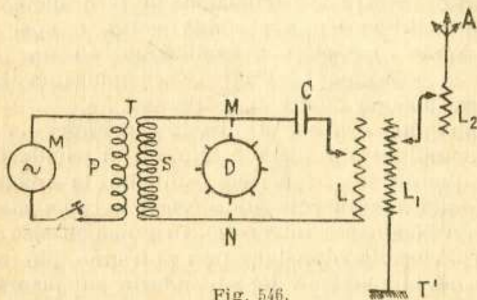


Fig. 546.

primario oscillante: questo comprende, come al solito, una induttanza *L* ed una capacità *C* caricata dal secondario *S* di un trasformatore *T*, di cui il primario *P* è unito ad un alternatore *M*. L'alternatore è monofase: ha, per lo più, 12 poli e compie 1800 giri al minuto primo. Il trasformatore *T* è del tipo industriale, e serve ad elevare il potenziale da 300 sino a 15.000 volta per la produzione delle scintille fra il disco *D* e gli elettrodi *M* e *N*; nelle stazioni fisse il trasformatore è immerso nell'olio.

Il disco *D* è coassiale con l'alternatore, compie quindi esattamente lo stesso numero di giri (me-

todo con disco sincrono); ha tanti denti quanti sono i poli dell'alternatore, e si produce una scintilla a ogni alternanza. Esso è di ebanite, ed ha una corona di bronzo da cui sporgono i denti.

La capacità C è formata da un certo numero di lastre di zinco separate da lastre di vetro: nelle stazioni fisse sono tutte immerse nell'olio; per le stazioni mobili invece, la stessa capacità è costituita da un certo numero di bottiglie di Leida, di forma cilindrica, aventi per armature le faccie argentate del vetro.

Con la induttanza primaria L è collegato magneticamente il circuito antenna-terra; l'induttanza L_t serve a intonare quest'ultimo circuito con quello primario $MDNLC$. Finalmente, K è un tasto che serve a chiudere e interrompere a piacere il circuito.

Mantenendo invariata la velocità di rotazione dell'alternatore e del disco che gli è congiunto, si ha un numero costante di scintille al minuto secondo, da 350 a 700 secondo i casi; esse producono al telefono della posta ricevente una vera nota musicale di altezza fissa; una costanza della nota così perfetta difficilmente si trova negli altri sistemi detti a scintilla musicale. L'altezza del suono poi è quella per cui l'orecchio è più sensibile.

La interruzione netta e brusca della scintilla dovuta alla grande velocità di rotazione del disco, fa sì che la durata complessiva della scintilla nel primario sia brevissima; e se la connessione col secondario è opportunamente scelta, la energia a questo comunicata non potrà ripassare al primario, perchè quando esso comincia a reagire, il primario è già interrotto.

Si avranno in tal modo i vantaggi dell'eccitazione a impulso con quelli dell'accoppiamento debole, vale a dire, il sistema antenna-terra emetterà onde

pure con periodo ben definito, di piccolo decremento: questo, in ogni caso, è eguale a quello del circuito meno ammorzato. Si verifica dunque che insieme al vantaggio della scintilla musicale, si raggiunge anche quello di una buona sintonia. Un altro vantaggio considerevole della trasmissione col disco rotante si è di ridurre di molto l'intervallo d'inattività dell'antenna; i gruppi d'onde si succedono cioè a brevissimi intervalli, aumentando così la velocità di trasmissione dei dispacci.

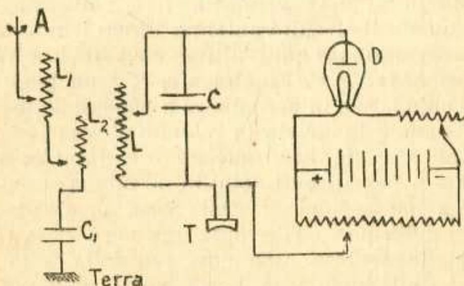


Fig. 547.

Alla stazione ricevente, che deve essere intonata con quella trasmittente, si usano come rivelatori delle onde, o il detector magnetico, o quello a carborundum, o la valvola Fleming. Il coherer a limatura non si usa più, per le ragioni che abbiamo detto.

La fig. 547 mostra una stazione ricevitrice: questa comprende l'antenna *A* connessa con il suolo, la quale raccoglie le onde inviate dalla stazione trasmittente; è intonata con essa per mezzo della induttanza L_1 e della capacità C_1, e trasmette l'azione

al circuito oscillante attraverso al trasformatore $L_2 L$. Questo circuito comprende, al solito, un'induttanza L e una capacità C, e si fanno variare entrambe in modo da costituire un sistema sintonizzato con quello dell'antenna. Finalmente il detector D, il quale è in un circuito derivato dal condensatore insieme col telefono T, trasforma i varii gruppi d'onde in altrettanti impulsi, in modo da dare al telefono una nota ben determinata, breve o lunga secondo la durata di emissione. Nella fig. 547 si vede che agisce come detector una valvola di Fleming.

Sono veramente meravigliosi i progressi che la radiotelegrafia ha compiuto in pochi anni, per opera specialmente del suo geniale inventore.

CAPITOLO XVIII.

Elettricità atmosferica.

450. **I lampi, i fulmini sono fenomeni elettrici.** — Era generale tra i Fisici il convincimento che i lampi ed i fulmini altro non fossero che grandi scariche elettriche, ma spetta a Beniamino Franklin la gloria di aver dimostrato la cosa in modo certo. Nell'anno 1752 Dalibard a Marly, presso Parigi, in seguito ai suggerimenti di Franklin, riuscì a condurre effettivamente a terra l'elettricità delle nubi, mediante un palo di ferro terminato in punta. Poco di poi lo stesso Franklin, avendo lanciato verso una nube temporalesca un cervo volante armato di una punta metallica, riusciva a trarre scintille dal cordoncino di canapa del cervo ch'egli reggeva, per isolarlo, con un nastro di seta. L'anno seguente Richmann, sperimentando a Pietroburgo nel modo di Dalibard, fu per sventura colpito in fronte da una grossa scintilla e fulminato all'istante: questi fatti fornirono la prova inconcussa che le nubi temporalesche sono cariche di elettricità.

Una nube altro non è che un ammasso di miriadi di goccioline d'acqua, le quali si possono considerare come altrettanti conduttori disseminati

in un mezzo coibente. La causa della elettrizzazione non è ancora conosciuta con certezza: chi l'assegna alla evaporazione, chi alla vegetazione, chi allo strofinio delle goccioline d'acqua con le roccie delle alte montagne o con i ghiaccioli sospesi nelle alte regioni, chi all'azione ionizzatrice della luce solare, chi ad azioni radioattive, chi finalmente al potenziale più basso cui si trova la terra in confronto della sua atmosfera: è probabile che tutte queste cause vi concorrano insieme.

Quando le goccioline si riuniscono per formare delle goccie più grosse, il potenziale della nube si accresce, perchè la capacità della goccia più grossa aumenta meno rapidamente della carica. Elevandosi così il potenziale della nube, esso potrà gradatamente differire da quello di una nube vicina o del suolo sottostante, in modo da determinare la scarica: questa è detta *lampo,* se accade fra due nubi; *fulmine* quando avviene fra una nube e il suolo.

151. **Diverse specie di lampi.** — Si suole, seguendo l'esempio di Arago, distinguere tre diverse *classi di lampi:*

1.° I *lampi lineari,* che sono tratti di fuoco per lo più tortuosi, qualche volta ramificati; tali scariche hanno la maggiore somiglianza con quelle de' nostri condensatori, e al pari di esse possono talora essere oscillatorie. Questi lampi raggiungono spesso lunghezze di parecchi chilometri, enormi rispetto a quelle delle scintille ottenute con le nostre macchine. Parecchie circostanze possono concorrere ad accrescerne la lunghezza: la presenza di nubi intermedie, per cui la scarica può assomigliarsi a quella dei quadri scintillanti; il grande valore del potenziale, e la circostanza che la distanza esplosiva aumenta più rapidamente della

differenza di potenziale; infine la minore densità dell'aria a quell'altezza.

2.° I *lampi di caldo* o *diffusi,* che illuminano tutta la superficie di una nube o tutto il suo contorno: si riguardano come un riflesso di lampi della prima classe, che guizzano dalla parte opposta della nube o nel suo interno. Appartengono a questa classe i *lampi di calore,* i quali sono probabilmente dovuti a temporali che scoppiano sotto l'orizzonte, e sono così lontani da renderci impercettibile il fragore del tuono che li accompagna.

3.° I *lampi globulari,* che sono globi di fuoco i quali si muovono lentamente e poi scoppiano subitamente con grande fragore, e producono effetti simili a quelli della esplosione di una bomba. È questa una forma di scarica assai rara, e però non potè essere bene studiata: venne osservata pure a Milano nel 1841; anche lo Spallanzani narra di una scarica simile avvenuta in un campo presso Pavia. V'ha chi la nega del tutto, attribuendola ad un'illusione ottica, o alla fantasia sgomenta di chi l'ebbe a narrare: — però è bene sapere che Plantè potè ottenere scariche globulari, facendo uso di un condensatore di grandissima capacità e caricato fortemente.

152. **Durata del lampo; tuono.** — La durata di un lampo è *per lo più* estremamente breve, probabilmente meno di $^1/_{1000}$ di secondo, quantunque la persistenza delle immagini sulla retina possa far supporre il contrario. Per convincersi della cosa, si può ripetere l'esperienza di Arago, che consiste nel far ruotare un disco a settori alternativamente bianchi e neri: esso pare grigio sotto un'illuminazione continua, ma sembra immobile quando viene illuminato dalla scintilla di una bottiglia di Leida, o da un lampo; il che dimostra che quella o questo

durano meno di quanto occorre, affinchè un settore nero vada a prendere il posto di uno bianco.

Il fragore del tuono che si ode dopo il lampo, è dovuto alla subitanea espansione e ripulsione dell'aria sulla via della scarica, susseguita dal suo violento ripiombare nello spazio rarefatto. Il tuono, com'è evidente, è simultaneo al lampo; si percepisce tuttavia dopo il lampo, perchè la velocità del suono è molto minore di quella della luce. Dall'intervallo fra i due fenomeni si può dedurre la distanza a cui la scarica è avvenuta; basta perciò moltiplicare 340 m., che è la media velocità del suono, pel numero dei secondi decorsi dall'istante in cui si percepisce il lampo a quello nel quale si comincia a udire il suono: il tempo che mette la luce a percorrere la distanza fra la nube e l'osservatore è trascurabile.

Se il lampo è relativamente corto e diritto, si ode un colpo secco, che succede tanto più vicino al lampo, quanto più la scarica è vicina; quando invece il lampo è lungo e sinuoso, il rombo del tuono si prolunga pel tempo che mette il suono a propagarsi dai limiti estremi del lampo sino all'orecchio, e per la ripercussione delle onde prodotta dalle nubi e dai monti.

153. **Effetti del fulmine.** — Gli effetti del fulmine sono gli stessi di quelli delle scariche de' condensatori, ma in scala maggiore, com'è naturale. Il fulmine fonde e può volatizzare fili e foglie metalliche; schianta gli alberi; uccide gli animali; spezza i muri, e gli altri mediocri conduttori o coibenti interposti. Scaricandosi in un suolo siliceo, fonde la silice e fabbrica quei tubi vetrificati detti *fulgoriti;* determina una grande quantità di ozono; accende le materie infiammabili, ecc., ecc. Bisogna però tener presente che i danni si verificano là

dove la trasmissione incontra una resistenza, sia per la poca conduttività, sia per la esigua sezione del materiale; mèntre non si verifica alcun danno, se per andare a terra la scarica incontra poca resistenza.

Notiamo intanto che il suolo sottoposto ad una nube procellosa è soggetto ad una energica induzione, e si carica di elettricità di segno contrario a quella della nùbe; ora le parti alte, prominenti, se conduttrici e in buona comunicazione con la terra, sono quelle dove la tensione elettrica aumenta rapidamente, e però sono maggiormente esposte alle scariche.

Non è bene quindi rifugiarsi, quando infuria il temporale, sotto gli alberi.

451. **Parafulmine di Franklin.** — Franklin per proteggere gli edifici dai danni del fulmine, pensò di munirli del *parafulmine* che porta il suo nome. Consiste esso in un'asta di ferro accuminata, la quale sormonta l'edificio e comunica mercè un grosso conduttore metallico con acqua sorgiva, od almeno col suolo perennemente umido. Il parafulmine sovente ha l'ufficio di *prevenire* le scariche repentine, cambiandole in scariche lente, che di notte rendono luminosa la punta fuoco di S. Elmo); sotto l'influenza della nube difatti la punta lascia sfuggire l'elettricità di segno contrario, e si verifica un moto di ioni; quelli di nome contrario vanno a neutralizzare silenziosamente l'elettricità della nube. Ma quando il disquilibrio elettrico avviene con troppa rapidità, cosicchè il flusso silenzioso non abbia tempo di compiersi, e la folgore cade, questa colpisce di preferenza il parafulmine, la cui tensione elettrica è maggiore di quella degli altri punti dell'edifizio; lo scaricatore allora offre alla corrente uno sfogo nel suolo con il quale è in ottima comu-

nicazione, e così è evitato ogni danno, e il parafulmine avrà compiuto *l'ufficio preservativo.*

L'azione preventiva è tanto più efficace quanto più la punta è aguzza; ma ad evitare la fusione che ne conseguirebbe per la caduta del fulmine, la si costruisce per lo più con un cono di rame avente l'apertura di 30°. Per soddisfare poi all'altro ufficio di preservare, è necessario che il parafulmine offra alla scarica una resistenza minore di qualunque altra parte dell'edificio.

455. **Nuovi parafulmini.** — Tutto questo andrebbe bene, se la corrente di brevissima durata a cui dà luogo la scarica di un fulmine fosse costante, come quella di una pila, o lentamente variabile, e invadesse tutta la sezione del conduttore; ma si tratta invece di una corrente probabilmente oscillatoria, rapidamente variabile in ogni caso, la quale si confina alla superficie in uno straterellino infinitamente sottile del conduttore, e dà luogo a fenomeni così complessi di induzione elettromagnetica, che i migliori conduttori, come le spranghe di rame di notevole sezione, possono opporre al passaggio di tali scariche resistenze enormi. Questo fatto è provato da studii e da esperienze che non possono trovar luogo nel presente Manuale: una cosa però è facile a intendere, che nel momento della scarica, l'asta del parafulmine e il conduttore devono essere percorsi da una corrente enorme; e la differenza di potenziale dei diversi punti fra di loro e con la terra è così grande, da dar luogo a *scariche laterali* dannosissime, come purtroppo succede di frequente.

Pertanto, se si vuol proteggere efficacemente un edificio dai danni del fulmine, il miglior sistema sarà quello di far correre lungo le costole, i cornicioni, gli spartiacqua del tetto, gli spigoli dei

muri e ogni altra parte sporgente, dei conduttori metallici, che possono con molta economia consistere in nastri o in fili di ferro zincato per proteggerli dalla ossidazione: il rame è un lusso inutile. Questa rete a larghe maglie si munisce di parecchi mazzi di punte portati da brevi peduncoli, specialmente nelle parti prominenti, e si stabilisce *in più punti* la sua comunicazione con il suolo, affondando gli scaricatori formati da ampie lastre di rame sino al primo strato d'acqua sotterraneo: se questo mancasse, bisognerebbe scavare fosse ampie e profonde ove il terreno è più umido, e affondarvi gli scaricatori insieme a qualche quintale di coke. Bisogna sopratutto curare la buona comunicazione col suolo, senza di che il parafulmine può diventare pericoloso: ottima è la comunicazione colla terra, quando è stabilita per mezzo de' tubi di ferro del gas e dell'acqua potabile. Questi devono essere riuniti alla rete metallica prima del loro ingresso nell'edificio; si riuniscano pure alla rete le grondaie e le altre masse metalliche esterne, badando però di fare il collegamento in più punti, in modo da costituire altrettanti circuiti chiusi [1].

456. **Potenziale atmosferico.** — Non è necessaria la presenza di nubi temporalesche sull'orizzonte per ottenere dall'atmosfera dei segni di elettrizzazione. Le misure elettrometriche mettono fuori di dubbio questo fatto che, salvo rarissimi casi, l'aria è elettrizzata positivamente, e la terra è negativa rispetto alla sua atmosfera; o, in altre parole, nella buona stagione l'atmosfera è ad un potenziale più alto della terra. Il P. Beccaria a cui si devono

[1] Chi desidera altre nozioni sull'importante argomento, può utilmente consultare la monografia del prof. O. Murani sui parafulmini. — Ed. Ulrico Hoepli, Milano.

le prime osservazioni sull'argomento, innalzava delle antenne isolate da terra, e ne metteva la base in comunicazione con l'elettroscopio. Se si ripete l'esperienza mettendo a comunicare con l'antenna un paio di quadranti dell'elettrometro di Lord Kelvin (§ 321), mentre l'altro paio comunica con il suolo,

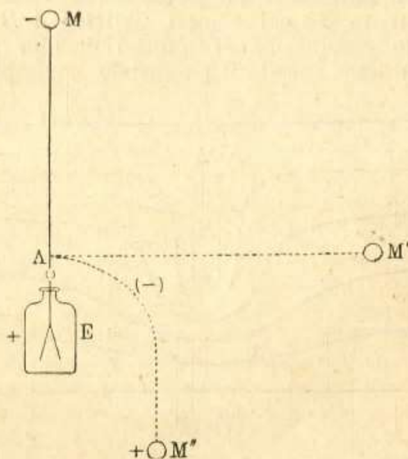


Fig. 548.

la deviazione dell'ago cui si è dato un potenziale costante, fornisce la misura della differenza di potenziale fra il suolo e l'antenna.

Per chiarire le cose, supponiamo che in un punto dell'atmosfera e sotto un cielo sereno, si unisca, per mezzo di un filo conduttore, un elettroscopio *E* con una sfera *M* posta più in alto dell'elettroscopio (fig. 548); allora questo si carica quasi sempre di elettricità positiva. Se la sfera è in *M'* e il filo

A M' è disposto orizzontalmente, l'elettroscopio non si elettrizza. Finalmente, se la sfera *M''* è più bassa dell' elettroscopio, questo si carica negativamente.

Le indicazioni dell'elettroscopio poi sono considerevolmente maggiori quando alla sfera *M* si sostituisce una punta conduttrice, la quale prende sempre il potenziale del punto dello spazio dove essa si trova. Se nel campo elettrico *A B C D* si porta un conduttore *M* munito di una punta *a* (fig. 549), esso prende il potenziale corrispondente

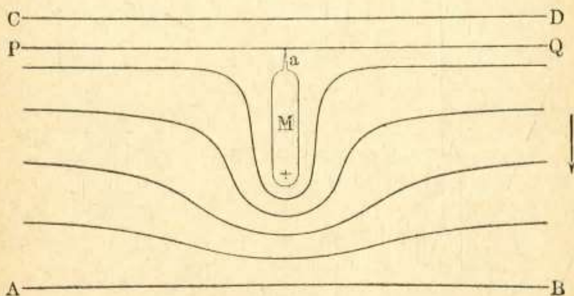


Fig. 549.

alla superficie di livello *P Q* che passa per la punta, e sul corpo *M* compare una carica positiva specialmente alla sua parte inferiore; le altre superficie di livello si dispongono pressapoco come indica la figura.

L'elettrometro con le sue indicazioni ci darebbe pertanto il valore del potenziale dovuto all'elettricità atmosferica nel luogo occupato dalla punta, se questa fosse perfetta. Ma le punte non sono mai tali, neppure quelle degli aghi da cucire; e quindi per ottenere il vero *valore del potenziale in un*

punto dell'aria, il miglior mezzo è quello ideato dal Volta, di collocare ivi la fiamma di una lampadina metallica isolata, unita col mezzo di un filo metallico all'elettrometro. I prodotti della combustione trasportano seco loro l'elettricità di cui è carica la superficie del conduttore finchè agisce la forza elettrica, finchè cioè il potenziale della lampada non sia eguale a quello dei punti immediatamente vicini. Alla fiamma si può sostituire una scatoletta di alluminio sottile contenente un po' di radio, e all'elettrometro a quadranti che non si può adoperare che a posto fisso, si sostituisce in viaggio l'elettroscopio della fig. 370.

Nelle stazioni fisse, per suggerimento di lord Kelvin, si unisce l'elettrometro a quadranti a un recipiente metallico pieno d'acqua, sorretto da piedi isolanti, e provveduto da un lungo cannello dal quale il liquido sgorga a goccie. Il serbatoio è messo in comunicazione con un paio di quadranti dell'elettrometro, mentre l'altro paio è in comunicazione con il suolo; l'ago, s'intende, è portato a un certo potenziale che deve rimaner costante, come si è detto sopra. E poichè l'equilibrio si verifica quando il recipiente ha raggiunto il potenziale che regna intorno all'orifizio di efflusso, si vede che l'elettrometro ci dà la differenza di potenziale fra questo punto e il suolo.

Questa differenza di potenziale dipende, oltre che dalla elettrizzazione dell'aria, da tutte le quantità di elettricità che possono esercitare la loro azione su quel punto, e sono distribuite sulle nubi, sulle accidentalità del suolo, o vengono trasportate da masse d'aria, dalla pioggia, ecc.

Mettendo davanti allo specchietto dell'elettrometro una fiamma, e proiettandone con una lente l'imagine riflessa sopra un foglio preparato per

la fotografia, il quale sia fatto scorrere verticalmente da un congegno d'orologeria, si possono registrare tutte le variazioni a cui va soggetto il potenziale atmosferico in un punto. La Conferenza internazionale di elettricità del 1884 raccomandò tali registrazioni continue e regolari; esse si eseguono difatti in alcuni Osservatori di meteorologia all'Estero ed in Italia. A Napoli, il Palmieri fece per lunghi anni importanti osservazioni sulla elettricità atmosferica; è a sperarsi che anche a Milano, dove le fiorenti industrie e i commerci non tolgono l'amore vivissimo alla scienza, si voglia contribuire a studi di tanta importanza.

Sopra una pianura, supposto il cielo sereno, di due punti sulla medesima verticale ha potenziale maggiore, in un dato istante, quello più alto; vale a dire la forza elettrica è diretta verso il basso.

Difatti, al di sopra di una pianura, si è trovato che le superficie di livello elettrico sono presso a poco piani orizzontali, e il valore del potenziale aumenta gradatamente con l'altezza, però in una proporzione diversa a seconda della stagione, dell'ora, del buono o cattivo tempo. Nel quale ultimo caso la distribuzione delle superficie equipotenziali può essere di molto turbata.

E poichè i potenziali dei vari punti dell'atmosfera vanno soggetti a rapide variazioni, converrà ammettere che vaghino qua e là masse d'aria elettrizzate, anche quando il cielo è sereno.

Se il suolo invece è irregolare, le superficie di livello più vicine ne seguono le ondulazioni, stipandosi le une sulle altre ne' luoghi prominenti (fig. 550). Attorno ad una casa, di cui tutte le parti possono essere considerate come comunicanti col suolo e per conseguenza aventi un potenziale zero, le superficie di livello elettrico sono quasi verticali in

vicinanza de' muri, e sovra il tetto si addossano le une alle altre nelle parti sporgenti; e però ivi la tensione elettrica e il pericolo della scarica, durante un temporale, saranno maggiori.

Per confrontare fra di loro le varie osservazioni, bisogna esprimere il *campo elettrico dell'atmosfera* adottando un unico sistema di misure. Ricordiamo che dividendo la differenza di potenziale di due punti per la loro distanza, si ha la forza elettrica media lungo la loro congiungente; e *se questa è normale alle superficie equipotenziali, il detto quo-*

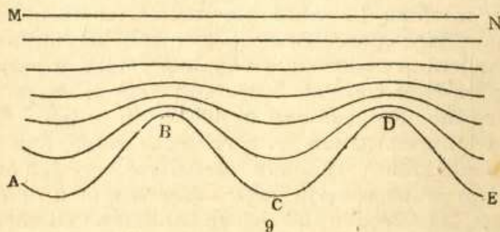


Fig. 550.

ziente dà il valore del campo. In generale se Δv è la differenza di potenziale di due punti che si trovano sulla direzione della normole a una superficie di livello, ad una distanza uguale a Δn, il rapporto $\frac{\Delta v}{\Delta n}$ dà il valore del campo: esso si chiama anche *gradiente elettrico* in uno dei punti considerati. Si c nviene di esprimere i potenziali in volta, le distanze in metri; cosicchè *il gradiente elettrico è misurato dalla differenza di potenziale, espressa in volta, di due punti situati sulla medesima normale a una superficie di livello, e distanti 1 metro.*

La direzione del gradiente è verticale solamente quando le superficie equipotenziali sono orizzontali: presso un muro, un tronco di albero, ecc., le superficie di livello essendo altrimenti distribuite, la direzione del gradiente, che coincide con quella del campo, è diversa.

Il campo, a ciel sereno e calmo, è quasi sempre diretto verso il basso, come si è detto sopra; e sulle cime de' monti ha un valore maggiore che nelle circostanti pianure, d'accordo col fatto che su quelle le superficie di livello sono più vicine l'una all'altra. Ivi il gradiente può arrivare ad alcune migliaia di volta per metro, mentre nella pianura circostante esso è solo di poche centinaia: il gradiente medio nelle vicinanze della superficie della terra è circa di 300 volta; non si osservano che raramente gradienti di 1000 volta e più.

Ma le osservazioni fatte vicine al suolo non bastano per giudicare della elettrizzazione dell'aria; all'uopo è necessario fare osservazioni a diverse altezze, ricorrendo ad ascensioni aerostatiche. In tal caso si munisce l'elettroscopio portato dal pallone di due fili metallici, pendenti l'uno dalla custodia e l'altro dalla sferetta dell'istrumento, e recanti all'estremità libere un po' di radio. Ciascun filo assume il potenziale della massa di aria dove il radio si trova, perchè l'aria in vicinanza del radio diventa conduttrice a cagione della grande ionizzazione da esso prodotta. Per avere il campo basta esprimere la deviazione delle foglie dell'elettroscopio in volta, e dividere il numero dei volta per la differenza delle lunghezze de' fili espressa in metri. — Si è trovato che il gradiente aumenta con l'altezza sino a 2000 metri circa; ma poi a maggiori altezze prende a diminuire, e al di sopra di 4000 metri diviene piccolissimo. L'importanza di

queste misure è evidente, quando si voglia formulare delle ipotesi per la spiegazione dell'elettricità atmosferica.

Tutto ciò si verifica con il tempo calmo e il cielo sereno: quando il cielo è nuvoloso e piove o nevica, ecc., le cose mutano profondamente. Il gradiente varia allora nello stesso luogo rapidamente di grandezza e di segno, e i valori assoluti del potenziale sono talvolta anormalmente elevati. Le goccie di gioggia, i fiocchi di neve, sono spesso elettrizzati, e predomina il segno negativo.

Qualunque siano le congetture per spiegare i fatti dell'elettricità atmosferica, bisognerà tener conto di una circostanza che deve avervi una grande influenza, ed è la ionizzazione dell'aria.

457. **Teorie relative all'elettricità atmosferica.** — Numerose sono le ipotesi fatte per ispiegare l'elettricità negativa della terra e quella positiva della sua atmosfera (§ 456). V' ha chi ammette, seguendo le idee di Ermann, che la terra abbia una sua propria carica negativa, sin dalle origini della sua formazione; di questa opinione è, fra gli altri, l'Exner. Altri invece rifiutano tale ipotesi, e suppongono che la carica negativa della terra e della sua atmosfera eguagli, in valore assoluto, quella positiva. E poichè in circostanze normali, ossia in un tempo calmo e sereno, la forza elettrica è diretta verso la superficie della terra, bisogna ammettere che una parte almeno della carica negativa passi alla terra.

Il Volta riteneva che l'evaporazione dell'acqua sia la causa principale della elettrizzazione della terra e della sua atmosfera, il vapore elettrizzandosi positivamente e l'acqua negativamente.

Questa ipotesi, difesa fino agli ultimi tempi dal prof. Palmieri, seduce per la sua semplicità, ma

esperienze scrupolose hanno dimostrato che l'evaporazione dell'acqua non costituisce una sorgente d'elettricità. Soltanto se il vapore è umido, misto cioè a goccioline di acqua, si elettrizza strofinandosi con dei solidi, come succede nella macchina elettrica di Armstrong.

Sohnke e Luvini (ann. 1889) hanno supposto in armonia con quanto ora si è detto, che la elettrizzazione dell'aria sia dovuta allo strofinio delle goccioline di acqua con i ghiaccioli che si trovano nelle alte regioni dell'atmosfera, il ghiaccio elettrizzandosi positivamente, l'acqua negativamente.

Elster e Geitel supposero che l'origine dell'elettricità atmosferica sia la ionizzazione dell'aria, prodotta dai raggi ultravioletti del sole nelle alte regioni dell'atmosfera. Ma quali cause varranno a produrre la loro separazione, in modo che la terra diventi negativa?

D'altro canto, l'aria stagnante delle grotte e del sottosuolo è fortemente ionizzata, e la causa non si può attribuire ai raggi ultravioletti, ma bisognerà ammettere ch'essa sia dovuta a sostanze radioattive; si è cioè indotti a pensare che la radioattività non è circoscritta ai soli corpi che ce l'hanno rivelata, ma sia invece un fenomeno molto diffuso in natura, sebbene in debole grado. Ebert, per spiegare la elettricità della terra e della sua atmosfera, si è appunto basato sulla radioattività dei corpi che formano la crosta terrestre: l'aria del suolo così ionizzata, quando si sprigiona all'esterno, cede più facilmente la sua carica negativa alle pareti delle fessure, il che è d'accordo con l'esperienza, ed esce dal suolo con un eccesso di ioni positivi. Si spiegherebbe in tal modo la elettrizzazione negativa della sfera terrestre, quella positiva dei bassi strati dell'atmosfera, la minore ionizzazione nella

stagione invernale quando la terra è in gran parte coperta dalla neve, dai geli, ecc.

Verosimilmente tutte le dette cause concorrono insieme alla ionizzazione dell'aria, e per mezzo di questa si spiegherebbero l'elettrizzazione negativa della sfera terrestre e l'elettrizzazione positiva degli strati inferiori dell'atmosfera.

Durante il mal tempo poi, la cosa si complica grandemente: il vapor d'acqua divenuto saturo per espansione, si condensa intorno ai ioni come altrettanti nuclei (§ 329); la condensazione accadrà prima intorno ai ioni negativi, cosicchè per il vento e la gravità si separano delle goccioline che formeranno delle nubi negative; altre nubi si formeranno in seguito per una ulteriore condensazione intorno ai ioni positivi.

Accade inoltre che i grossi ioni e le particelle neutre in sospensione nell'aria favoriscono grandemente la formazione degli strati inferiori di nubi, ossia gli strati e i cumuli che sono spesso ad altezze non superiori ai due o tremila metri. Tali particelle infatti condensano il vapor d'acqua appena soprassaturo; e però quando una massa di aria umida si eleva e si raffredda per espansione, è sovra esse che da prima si formano le goccioline. Quando queste hanno tale grossezza che la velocità di caduta sia compensata dalla velocità di ascensione dell'aria, rimangono presso a poco stazionarie. La rimanente massa d'aria poi che continua ad elevarsi, non può più formare delle goccioline per condensazione del suo vapore che sui ioni ordinari, ma si richiede una sovrasaturazione considerevole, vale a dire una tensione di vapore ben maggiore di quella massima ordinaria: ne nasce che si deve salire più in alto per ottenere un secondo strato di nubi formato sui piccoli ioni, ve-

rosimilmente sino all'altezza de' cirri che si valuta a $10 \div 12$ km.

Quando poi le goccioline si unicono insieme per formare delle goccie più grosse, il potenziale di queste si accresce enormemente, come si è detto (§ 450), e può dar luogo a lampi e fulmini.

Di più le nubi, oltre alla carica propria, acquisteranno le cariche indotte per influenza da altre; indi potranno separarsi in due o più parti che saranno quali positive, quali negative, e risolversi in pioggia, lambire montagne, dare scintille; si vede così quanto debba riuscire complesso il fenomeno nella stagione burrascosa.

Si può però dire, a ogni modo, che noi viviamo fra le opposte armature di un immenso condensatore, il cielo e le nubi formando l'armatura superiore, la terra l'armatura inferiore, e l'aria interposta il dielettrico. Quando una nube procellosa discende, siamo esposti a una scarica esplosiva per la rottura del dielettrico, là dove la tensione supera un certo limite. Allora qualche chilometro quadrato di nube e qualche chilometro quadrato di terra sono le due armature, e l'intervallo di separazione non può riuscir grande. Se la nube e la terra fossero conduttori perfetti, tutta questa enorme quantità di elettricità sarebbe scaricata da un fulmine di proporzioni spaventevoli; ma, per buona ventura, se ne scarica una parte soltanto. Essendo allora turbato l'equilibrio delle parti costituenti la nube, si produrranno altre scariche interne fino a un nuovo stato di equilibrio, e anche questa circostanza concorre a prolungare il rombo del tuono.

FINE

1600 MANUALI HOEPLI

Pubblicati a tutto Marzo 1917.

Che cosa sono i Manuali Hoepli?

I. – *Una raccolta iniziata e continuata col proposito di diffondere la cultura; che tratta in forma popolare le lettere, le scienze, le arti e le industrie.*

II. – *I Manuali Hoepli sono sempre compilati da specialisti per ogni materia e sempre ove occorra illustrati copiosamente, e, ad ogni ristampa riveduti ed arricchiti di nuove aggiunte per tenerli al corrente delle più recenti conquiste della scienza.*

III. – *Nella Collezione dei Manuali Hoepli ognuno può trovare un testo riguardante i suoi studi, e, se mai, rintrac-*

SPETTRI

DI EMISSIONE E DI ASSORBIMENTO

